



Diplomarbeit

Auslegung, Aufbau und Inbetriebnahme einer Wirbelschichtapparatur im Labormaßstab für thermische Umwandlungsprozesse von Biomasse

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Hermann Hofbauer

unter der Betreuung von

Proj.-Ass. Dipl.-Ing. Dr. techn. Jitka Hrbek

E166 Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Techn. Biowissenschaften

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Daniel Eßletzbichler, BSc

Matr. Nr. e0925476

Wolkersdorf 9

3240 Mank

Wien, Oktober 2017

Daniel Eßletzbichler

Ich nehme zur Kenntnis, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Wien, Oktober 2017

Daniel Eßletzbichler

Danksagung

Im Speziellen möchte ich mich bei Herrn Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Hermann Hofbauer für die Möglichkeit, meine Diplomarbeit am Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Techn. Biowissenschaften der TU Wien, schreiben zu können und darüber hinaus die Gelegenheit bekommen zu haben, meine theoretischen Überlegungen sehr praxisnahe durch den Aufbau einer Versuchsapparatur umsetzen zu dürfen, bedanken. Weiters gilt mein besonderer Dank Frau Projektass. Dipl. Ing Dr. techn. Jitka Hrbek für die ausgezeichnete Betreuung und Unterstützung über die gesamte Laufzeit meiner Arbeit. Ebenfalls möchte ich mich für die wertvolle Hilfe bei allen Kollegen und Mitarbeitern im Prüflabor für Feuerungsanlagen bedanken. Außerdem gilt mein Dank allen Studienkollegen, Mitarbeitern und Arbeitsgruppen am Institut, welche stets für Fragen zur Verfügung standen und deren Erfahrungen bereitwillig mit mir teilten. Einen wesentlichen Anteil zur Realisierung der Versuchsapparatur und mein damit verbundener Dank, gilt Hr. Jörg Artner, ohne dessen hervorragende Arbeit die Versuchsapparatur nicht zeitgerecht und erfolgreich in Betrieb genommen werden hätte können.

In besonderem Maß möchte ich mich bei meiner Familie bedanken ohne deren Geduld, Rückhalt und stets positiven Zuspruch über all die Jahre ein erfolgreicher Abschluss meines Studiums nicht möglich gewesen wäre.

Danke für eure Unterstützung!

Kurzfassung

In Bezugnahme auf die stets aktuelle Thematik des Klimawandels respektive Umweltschutzes und den damit parallel voranschreitenden Bemühungen und Fortschritten der Forschung fossile durch erneuerbare Energieträger zu ersetzen, gewinnt die Nutzung von Biomasse immer mehr an Bedeutung. In weiterer Folge verschiebt sich der Fokus hin zur Nutzungsoptimierung und der möglicherweise auftretenden Problemstellungen dieser alternativen Brennstoffe. Wenn gleich schon eine breite Palette an festen Biobrennstoffen hinsichtlich der eben genannten Eigenschaften untersucht wurden und Problemfelder hinlänglich bekannt sind, gibt es dennoch einen erheblichen Forschungsbedarf in Bezug auf die anfallende Asche. Speziell im Zusammenspiel mit dem eingesetzten Bettmaterial bei Anwendung in Wirbelschichtanlagen, infolge thermischer und chemischer Umwandlungsprozessen, gibt es einige Problemfelder. Sowohl bei Anwendung von Biomasse in Wirbelschichtverbrennungsanlagen als auch bei Ein- oder Mehrbettwirbelschichtvergäsern zur Erzeugung von Produktgas für weitere Synthesen, bleibt stets die Problematik der anfallenden Asche. Eine niedrige Ascheschmelztemperatur stellt zum einen eine technologische Limitierung der Anlage dar und führt in weiterer Folge bei Interaktion mit dem Bettmaterial der Wirbelschichtanlage zu Agglomerationen und Anbackungen an oftmals notwendigen Einbauten oder Innenwänden. Außerdem kann durch Schlackenbildung ein Verkleben des Anströmbodens zu erheblichen Störungen des Anlagenbetriebs bis hin zum Stillstand führen.

Inhalt und Ziel dieser Arbeit ist die Auslegung, Designfindung mit anschließendem Aufbau und Inbetriebnahme einer Wirbelschichtapparatur im Labormaßstab zur kontinuierlichen Verbrennung von Biomassepellets sowie Durchführung der Erstversuche mit Fokus auf die anfallende Asche. Beginnend mit den Grundlagen zur Biomasse, wird des Weiteren auf den thermo-chemischen Prozess als auch auf die anlagentechnische Umsetzung der Wirbelschichttechnologie mit deren theoretischen Grundlagen eingegangen. Der

Aschebildungsprozess mit den sich daraus ergebenden Problemstellungen schließen den theoretischen Teil der vorliegenden Arbeit ab. Für die praktische Umsetzung wurde eine externe Firma beauftragt, die Apparatur entsprechend unseren Vorgaben zu realisieren. Die vorangegangenen Planungsgespräche ergaben naturgemäß konstruktiv notwendige Änderungen der Apparatur und führten schlussendlich zum tatsächlichen Design. Parallel dazu wurde auf Grundlage der getätigten Auslegungsberechnungen sämtliches zum Betrieb der Apparatur notwendiges Equipment organisiert und vorbereitet. Nach erfolgtem Aufbau und Montage wurde mit der schrittweisen Inbetriebnahme bis hin zur Einsatzbereitschaft fortgesetzt.

Der Versuchsteil untergliedert sich in den wirbelschichtspezifischen Teil, welcher sich im Wesentlichen auf die Messung des Druckverlustverlaufs des Lochbodens und Wirbelschicht in Abhängigkeit der Fluidisierungsgeschwindigkeit beschränkt. Die im Anschluss durchgeführten Versuche im Heißbetrieb lieferten die gewünschten Mengen an Asche deren Ascheschmelzverhalten mittels Erhitzungsmikroskop mit der aus genormten Bedingungen im Muffelofen erzeugten Aschen gegenübergestellt wurden. Die Vergleiche des Ascheschmelzverhaltens und den daraus abgeleiteten Erweichungs- bzw. Fließtemperaturen zeigten durchwegs niedrigere Erweichungstemperaturen der Wirbelschichtaschen gegenüber den Ascheproben aus dem Labor-Muffelofen. Qualitativ lieferten die Ascheschmelzkurven der ausgiebten Ascheproben aus der Wirbelschichtapparatur, welche mit einem Erhitzungsmikroskop aufgenommen wurden, nahezu identes Verhalten.

Den Abschluss bildet eine weitere Versuchsreihe mit parallel aufgebauter Abgasmessung, um entsprechend Aufschluss über den Verbrennungsprozess in der Wirbelschichtapparatur zu erhalten. Die Versuche zeigten, dass in Hinblick auf den Verbrennungsvorgang einige kleinere Optimierungen betreffend Lochboden, Brennstoffzufuhr und Positionierung der Abgas-Messsonde vorgenommen werden müssten, um auch hier einer optimalen Verbrennung hinsichtlich Abgaszusammensetzung nahe zu kommen.

Zusammenfassend lässt sich anhand der durchgeführten Versuche sagen, dass sich ein idealer Betriebspunkt der Anlage nur schrittweise realisieren lässt, um bei Verwendung einer bestimmten Biomasse, wirbelschichttechnisch als auch verbrennungstechnisch, ein definiertes Optimum zu erreichen.

Abstract

With reference to the present issues of climate change and environmental protection, and the parallel efforts and advances of research the use of biomass is becoming more and more important in relation to replace fossil fuels by regenerative and renewable sources.

The focus is on fuel properties, fuel usage and problem areas of these alternative fuels. Although a wide range of solid biomass fuels have been investigated and the problem areas are well known, there is a significant demand on research regarding the ash of the biomass used in combination with the bed material of the fluidized bed system. Both the application of biomass in fluidized-bed combustion plants as well as single- or dual-fluidized bed gasifier for the production of producer gas for further syntheses, the problem of ash agglomeration as a result of fused ashes interacting with the bed material still remains. A low melting temperature of the biomass ashes is a technological limitation of the system. Fouling and slagging issues on the distributor plate of the fluidized bed reactor as another consequence can lead to considerable disturbances of the plant operation up to a standstill.

The topic and aim of this thesis is the technical layout, design as well as construction and commissioning of a fluidized bed system in laboratory scale for continuous combustion of biomass pellets and initial tests with focus on the ashes. Starting with the properties of biomass, the thermochemical process and technical implementation of fluidized bed technology with their theoretical fundamentals will be discussed. The ash formation process with the resulting issues and problems complete the theoretical part of this work. For the practical implementation, an external company was contracted to implement the equipment according to our specifications. Due to previous planning discussions the design resulted in the actual final design. At the same time, all equipment necessary for the operation of the apparatus was organized and prepared based on the design calculations made. After assembling and installation of the equipment has been

completed, it was possible to continue with the step-by-step commissioning up to the readiness for operation.

The experimental part is subdivided into the fluidized bed specific part, which is essentially focused on measuring of the pressure loss profile of the perforated distributor and fluidized bed as a function of the fluidization velocity. The experiments carried out in hot operation provided the desired amounts of ash whose ash melting behavior was compared by means of a heating microscope with the ash produced from standardized conditions in the muffle furnace. A comparison of the ash melting behavior and the resulting softening and melting temperature showed a slightly lower softening temperature of the ash produced in the experimental apparatus. On the other hand, by comparing the ash melting curves of the ash produced in the experimental apparatus, almost identical behavior could be determined from the experiments.

Finally, a further series of experiments with flue gas measurement were carried out to obtain information about the combustion process in the fluidized bed apparatus. The tests showed that, with a view to the combustion process, a few minor optimizations concerning the perforated air distributor, the fuel supply and the positioning of the flue gas measuring probe have to be carried out in order to approach an optimal combustion with regard to the flue gas composition.

Based on the experiments carried out, it can be said that an optimum operating point of the plant can only be realized step by step and thus achieve a defined optimum in the use of a certain biomass by means of fluidized-bed technology as well as combustion technology.

Inhaltsverzeichnis

Aufgabenstellung und Herangehensweise	1
Einleitung	3
2.1 Energienutzung und Bioenergie	3
2.2 Energiesituation in Österreich	5
Grundlagen	7
3.1 Biomasse	7
3.1.1 Geschichte	7
3.1.2 CO ₂ -Neutralität der Biomasse	7
3.1.3 Definition und Zusammensetzung	9
3.1.4 Einteilung	11
3.1.5 Pflanzennährstoffe und Elementgehalte.....	12
3.1.6 Energieträgerspezifische Eigenschaften.....	15
3.1.7 Physikalisch-Mechanische Eigenschaften.....	17
3.1.8 Elementaranalyse und Physio-chemische Eigenschaften.....	18
3.2 Thermo-chemische Umwandlungsprozesse	19
3.3 Vergasungstechnik.....	20
3.3.1 Grundlagen der Vergasung.....	20
3.3.2 Wärmeeinbringung	21
3.3.3 Vergasungsmittel und Produktgas	22

3.3.4	Arten von Vergasern	23
3.4	Verbrennungstechnik	25
3.4.1	Grundlagen der Verbrennung	25
3.4.2	Wirbelschichtfeuerung	26
3.5	Wirbelschichttechnik	30
3.5.1	Verfahrenstechnische Kenngrößen der Wirbelschichttechnik	31
3.5.2	Fluidisierung und Wirbelschichtzustände	32
3.5.3	Zustandsdiagramme	36
3.5.4	Bettmaterial	39
3.5.5	Gasverteilerböden	41
3.6	Asche in Wirbelschichtanlagen	44
3.6.1	Bestandteile und Bildungsprozess	44
3.6.2	Schmelzverhalten und deren Bestimmungsmethoden	44
3.6.3	Einfluss der Aschekomponenten auf die Erweichungstemperatur	46
3.6.4	Ascheproblematik in Wirbelschichtanlagen.....	47
3.6.5	Gegenmaßnahmen	48
	Praktischer Teil.....	49
4.1	Anforderungen und Voraussetzungen.....	49
4.2	Design und Planung	51
4.2.1	Funktionsschema	51
4.2.2	Brennstoffzufuhr.....	53
4.2.3	CAD Planung.....	55
4.2.4	Messstellenpositionierung.....	58
4.2.5	Werkstoffauswahl	59
4.3	Auslegung und Berechnung wirbelschichttechnischer Kennzahlen.....	60
4.3.1	Klassifikation nach Geldart	60
4.3.2	Lockerungs- und Schwebegeschwindigkeit	61

4.3.3	Arbeitspunkt der Wirbelschichtapparatur	65
4.3.4	Gasverteilerboden und Druckverlustberechnung	71
4.3.5	Brennstoffmenge und -analyse	75
4.3.6	Längsausdehnung Axial-Rohrkompensator	79
4.3.7	Schüttkegel Quarzsand.....	80
4.4	Konstruktive Ausführung.....	81
4.4.1	Gesamtaufbau	81
4.4.2	Brennstoffzufuhr mit Speicherbunker.....	83
4.4.3	Entleerungsmöglichkeit und Anströmboden.....	85
4.4.4	Messstellenausführung.....	86
4.4.5	Apparatur-Stückliste	87
4.5	Equipmentauswahl.....	87
4.5.1	Hauptkomponenten.....	87
4.5.2	Equipment-Stückliste	88
4.6	Elektrische Installation und Ausführung.....	88
4.6.1	Funktionsschema und Schaltplan	88
4.6.2	Realisierung und Aufbau.....	90
4.6.3	Elektrokomponenten-Stückliste.....	92
4.7	Inbetriebnahme	92
4.7.1	Messdatenerfassung	92
4.7.2	Heizschalenregelung mittels PID-Regler.....	94
4.7.3	Kalibrierung der Brennstoffzuführung.....	95
4.7.4	Bereitstellung und Vorbereitung des Bettmaterials.....	98
4.7.5	Druckprüfung	101
4.8	Erstversuche	102
4.8.1	Druckverlustmessung.....	102
4.8.2	Versuch 1 und 2 - Wirbelschicht	109

4.8.3	Ascheschmelzverhalten.....	113
4.8.4	Versuch 3 – Abgasmessung	119
4.9	Optimierungsmöglichkeiten	122
4.9.1	Konstruktive Optimierung.....	122
4.9.2	Mess- und prozesstechnische Optimierung.....	123
	Schlussbetrachtung und Ausblick	124
	Literaturverzeichnis.....	128
	Abbildungsverzeichnis	133
	Tabellenverzeichnis.....	137
	Anhang	139
	A - Nomenklatur	139
	B – Gesamtstückliste Versuchsapparatur	143
	C – CAD-Zeichnung Versuchsapparatur.....	144
	D – Druckverlustmessungen.....	145
	E – Siebturmanalyse.....	150

Kapitel 1

Aufgabenstellung und Herangehensweise

Das Klassifizieren und Vergleichen von Brennstoffen stellt ein nahezu unendliches Forschungsgebiet dar und hat besonders in Zusammenhang mit der Wirbelschichtverbrennung und -vergasung noch großes Potential. Das Abbrandverhalten, als auch die anfallenden Mengen sowie Zusammensetzung und die daraus resultierende Problematik mit der entstandenen Asche, ist für eine Vielzahl an biogenen Festbrennstoffen, welche in reiner als auch in gemischter Form vorliegen, zum Teil schon hinlänglich bekannt und in einschlägiger Fachliteratur festgehalten. Ebenso die Aschezusammensetzung als auch das Verhalten und die Beeinflussung des Ascheschmelzverhaltens durch Zugabe von Additiven wurde teilweise schon als Grundlage einiger Forschungsarbeiten herangezogen. Einen weiteren Schritt stellt die Untersuchung der zurückgebliebenen Asche im Wirbelschichtbett dar, was auch die grundsätzliche Aufgabenstellung dieser Arbeit darstellt.

Die Voraussetzung zu schaffen, Untersuchungen von unterschiedlichsten Biomassebrennstoffen in einer Wirbelschichtapparatur vorzunehmen und als weiteren Schritt das Verhalten von Ascherückständen im Wirbelschichtbett bei variierender Prozessführung bewerten zu können, bildet im Wesentlichen den Kern der vorliegenden Arbeit.

Unter Beachtung einiger Vorgaben hinsichtlich Brennstoffzufuhr, maximal möglicher Betriebstemperatur sowie standortbezogene Rahmenbedingungen, wurde mit dem Anfertigen von Funktionsschemen zur Designfindung begonnen und auf Basis dieser Überlegungen die konstruktiven Anforderungen festgelegt. Eine dazu parallel mitgeführte Auslegungsberechnung einiger wesentlichen Wirbelschichtkomponenten und die damit einhergehende Festlegung der Anforderungen an das benötigte Equipment zum Betrieb der Versuchsapparatur, stellten den

ersten Teil zur Realisierung der Anlage dar. Die Anfertigung, konstruktive Ausführung sowie Montage des Stahlbaus wurden durch eine externe Firma in einem Zeitraum von rund zwei Monaten ausgeführt. Die im Anschluss vorgenommene Inbetriebnahme, Einstellung bzw. Kalibrierung sämtlicher betriebsrelevanter mechanischer als auch elektronischer Bauteile, stellte einen wesentlichen zeitlichen Faktor dar.

Die in dieser Arbeit beschriebenen Erstversuche bilden dabei den Anstoß einer Vielzahl an individuell durchführbaren Versuchsmöglichkeiten mit der im Zuge dieser Arbeit aufgebauten Versuchsapparatur. Als Referenz zu den Ascheschmelzversuchen der in der Wirbelschicht erzeugten Aschen, wurden die nach entsprechend normativen Vorgaben hergestellten Aschen bei 550°C als auch der individuell gewählten, jedoch speziell für die Wirbelschichtvergasung interessanten Temperatur von 850°C, herangezogen.

Eine Schlussbetrachtung und die Beschreibung der Analyseergebnisse sowie Möglichkeiten zur Optimierung hinsichtlich Betrieb der Apparatur und Messdatenerfassung, stellen neben dem Ausblick und Anregung zu weiteren forschungsrelevanten Versuchsausführungen, den Abschluss der vorliegenden Arbeit dar.

Kapitel 2

Einleitung

2.1 Energienutzung und Bioenergie

Der stetig wachsende Bedarf an Energie stellt eine der dominierenden Herausforderungen an Mensch, Technik und Politik für die kommenden Jahrzehnte dar und wird somit auch immer mehr zum Kernthema wissenschaftlicher Behandlungen im Bereich der Energie- und Umwelttechnik. Eine dementsprechend positive Entwicklung gibt es bereits im Bereich der Forschung, um den zukünftigen Anforderungen gerecht zu werden.

Seit über einem Jahrhundert haben fossile Energieträger wie Kohle, später Erdgas und Erdöl Holz als die dominierende Primärenergiequelle ersetzt und die technische Nutzung in Bezug auf Infrastruktur und Verbraucherverhalten teilweise nahezu perfektioniert. Der verstärkten Produktion und Nutzung von Biomasse für energetische Zwecke geht die Entstehung eines Marktes für Bioenergie einher, was wiederum eine wichtige Grundlage für die weitere technische Entwicklung und Forschung darstellt.

Der wohl wichtigste Ansatzpunkt für nachhaltigen Umgang mit Energie stellt die Reduktion der CO₂-Emissionen aus der Nutzung fossiler Energieträger dar. Der Einsatz von Biomasse als CO₂ neutrale Kohlenstoffquelle rückt zwangsläufig immer mehr in den Fokus auf der Suche nach geeigneten Alternativen.

Eine Betrachtung des weltweiten Primärenergiebedarfes über die letzten Jahrzehnte zeigt einen nahezu exponentiellen Anstieg wobei ein Ende des Wachstums derzeit nicht oder nur sehr schwer absehbar ist. Abbildung 2.1-1 zeigt sehr deutlich, dass bei Betrachtung der letzten 40 Jahre, eine

Verdoppelung des Energiebedarfs auf über 500 EJ/Jahr stattgefunden hat. Der Ausblick zur globalen Energieversorgung bis 2050 basiert auf fortschreitender aktuellen Ausbauraten der erneuerbaren Energien sowie der hohen Priorität der Verdrängung bestehender konventioneller Energieträger. [1]

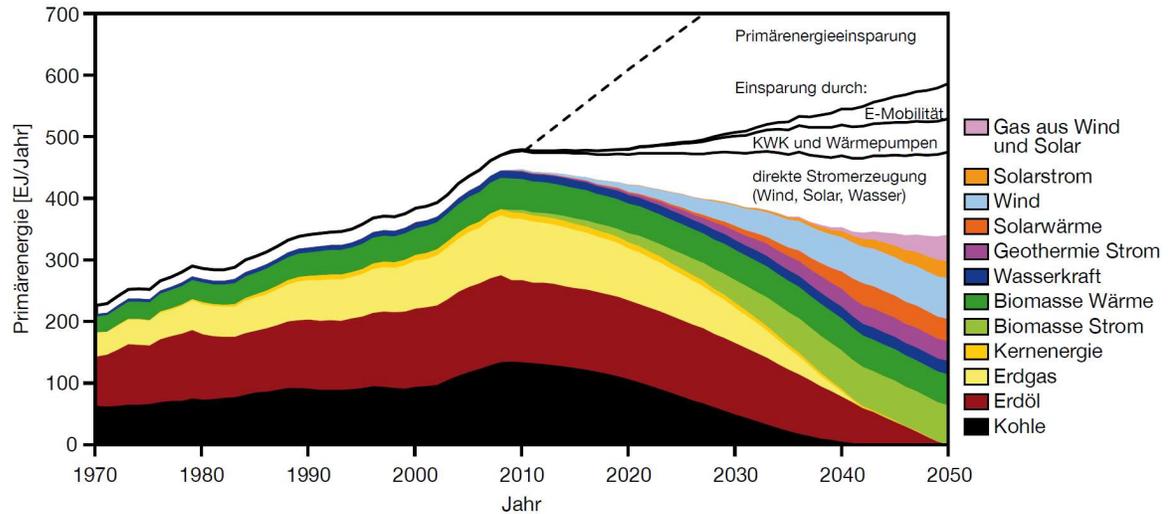


Abbildung 2.1-1: Vision zur globalen regenerativen Energieversorgung bis 2050 [1]

Biomasse kann einen signifikanten Beitrag dazu leisten, um politische, wirtschaftliche als auch technische Ziele zu erreichen, sofern es gelingt, das Potential zu nutzen und dadurch die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern zu reduzieren, bzw. auf ein Minimum zu senken. Derzeit decken erneuerbare Energieträger einen vergleichsweise kleinen Teil des globalen Primärenergiebedarfs ab. Dargestellt in Abbildung 2.1-2 liefert Biomasse mit 50 EJ einen Anteil von rund 10% des jährlichen globalen Bedarfs an Energie. [2]

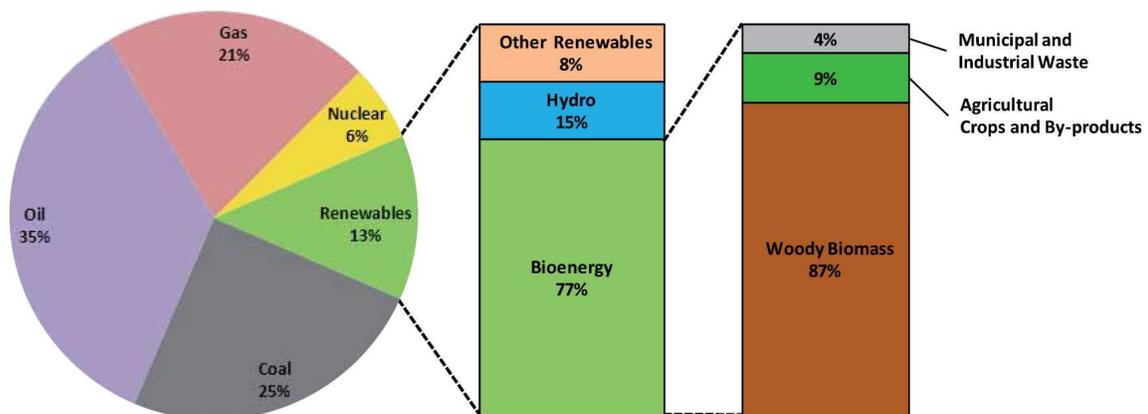


Abbildung 2.1-2: Bioenergie im globalen Energiemix [2]

Großes Potential gibt es durch zusätzlichen Einsatz von bisher eher ungenutzten Ressourcen wie Altholz und dem Forcieren von schnellwachsenden Energiepflanzen und Getreide unter entsprechender Rücksichtnahme des Nahrungsmittelbedarfs [2]. In Anbetracht derzeitiger politischer und wirtschaftlicher Ziele, sowie dem Anstreben, das vorhandene Potential der Biomasse auszuschöpfen, muss mit einem signifikanten Anstieg des Bedarfs an Anbaufläche, Infrastruktur sowie finanziellen Anstrengungen gerechnet werden, um eine angestrebte Transformation längerfristig erfolgreich gestalten zu können.

2.2 Energiesituation in Österreich

Ähnlich wie schon in Abbildung 2.2-1 gezeigt, ist auch der Energieeinsatz in Österreich kontinuierlich gewachsen und von jährlichem Energiezuwachs geprägt. Bei einer durchschnittlichen Steigerung von jährlich rund 1,5% seit 1990 beträgt der Bruttoinlandsverbrauch für das Jahr 2013 mehr als 1.400 PJ. Weiterhin dominieren auch hier die fossilen Energieträger mit etwa zwei Drittel. Der restliche Anteil auf den Gesamtverbrauch bilden die erneuerbaren Energien. Parallel zum stetigen Anstieg an gesamt verbrauchter Energie, kann für den Zeitraum von 1970 bis 2013 ein deutlicher Zuwachs des Bruttoinlandsverbrauchs an erneuerbarer Energie verzeichnet werden. Bei einer Reduzierung des Energiekonsums könnten die regenerativen Energieträger ihren derzeitigen Anteil von 30% auf knapp 60% verbessern, wie in Abbildung 2.2-1 als Ausblick bis 2030, dargestellt. [3]

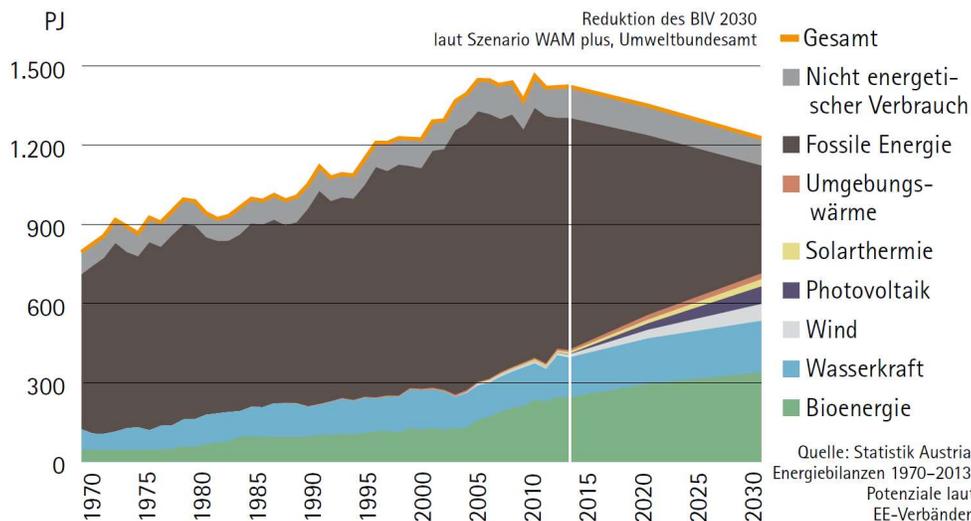


Abbildung 2.2-1: Entwicklung Bruttoinlandsverbrauch Energie und Potenziale bis 2030 [3]

Die derzeitige Drittelaufteilung von 2 zu 1 für fossile Energieträger kann der nachfolgenden Grafik entnommen werden und zeigt sehr deutlich die starke Abhängigkeit von Öl und Gas.

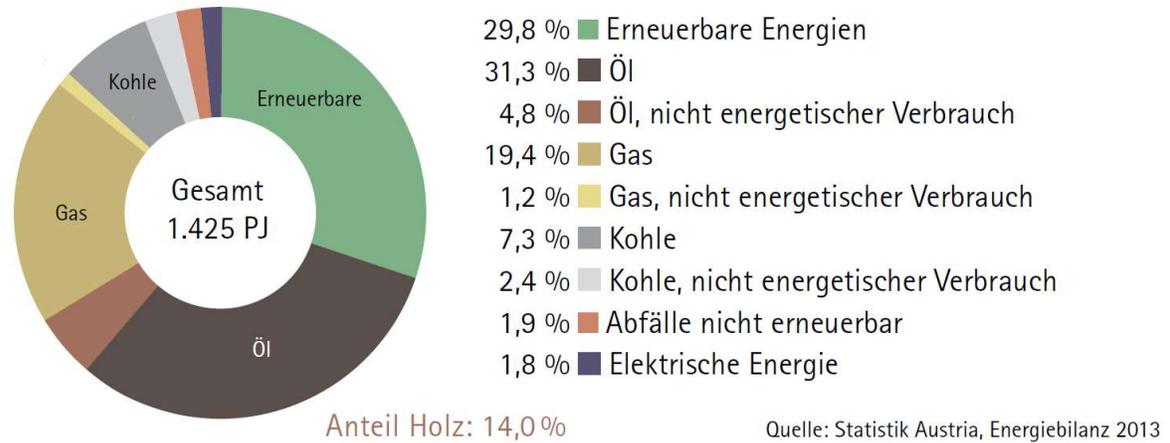


Abbildung 2.2-2: Bruttoinlandsverbrauch Energie 2013 [3]

Der Anteil an erneuerbaren Energien teilt sich überwiegend in Bioenergie mit knapp 60% und Wasserkraft mit über 35% auf. Den Rest teilen sich Windenergie, Geothermie sowie Solarthermie und Photovoltaik. Eine detaillierte Aufteilung des Bruttoinlandsverbrauchs der eben genannten Energieträger, bezogen auf das Jahr 2013, zeigt Abbildung 2.2-3. [3]

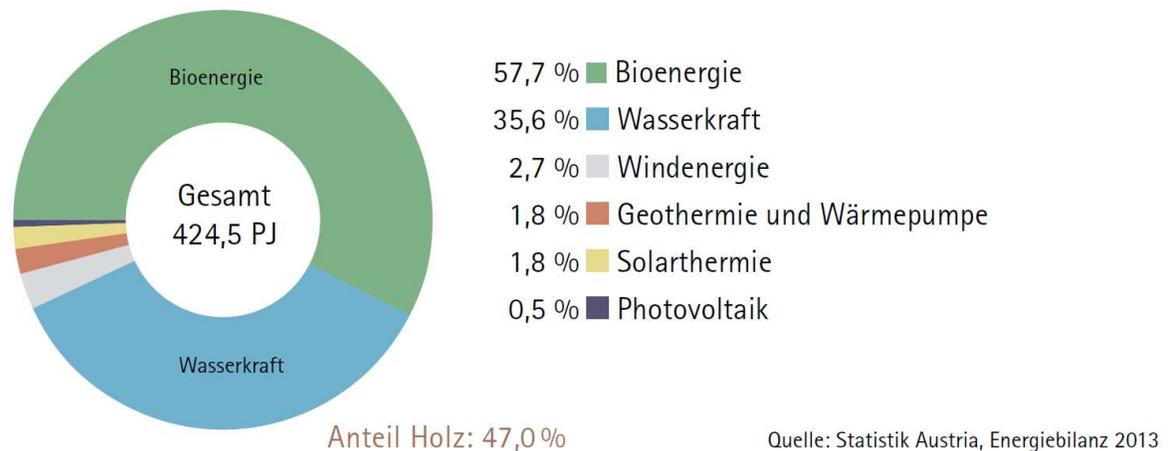


Abbildung 2.2-3: Bruttoinlandsverbrauch erneuerbare Energieträger 2013 [3]

Kapitel 3

Grundlagen

3.1 Biomasse

3.1.1 Geschichte

Historisch gesehen ist die Nutzung von Biomasse als Energiequelle eine der frühesten Formen der Energiebereitstellung. Nach wie vor stellt die Biomasse in nicht industrialisierten Ländern den wichtigsten Energieträger dar und ist somit für Millionen von Menschen unverzichtbar. Die Reduktion fossiler Brennstoffe zur Entlastung der Umwelt und die damit verbundene Suche nach alternativen, neuartigen Technologien zur Energiegewinnung, treibt die Entwicklung fortschrittlicher, bzw. optimierter Prozesse mit Biomasse als Brennstoff stetig voran.

Diese Entwicklung rund um das Thema „Energie aus Biomasse“ betrifft gegenwärtig nicht nur den technischen Sektor, welcher dazu aufgerufen ist, technische Lösungen und Umsetzungen zu liefern, sondern wird auch auf politischer, wissenschaftlicher wie auch gesamtgesellschaftlicher Ebene diskutiert und spiegelt somit auch die Wichtigkeit, bzw. Abhängigkeit unserer Gesellschaft in Fragen der Energieerzeugung wider. [4]

3.1.2 CO₂-Neutralität der Biomasse

Biomasse kann als gespeicherte Sonnenenergie betrachtet werden. Dabei wandeln Pflanzen in einem stetigen biochemischen Prozess, der Photosynthese, die Energie des Sonnenlichts in

Biomasse um. Den Kohlenstoff (C) des direkt aus der Atmosphäre gewonnenen CO_2 nutzt die Pflanze zum Wachstum und setzt den Sauerstoff (O_2) wieder frei.

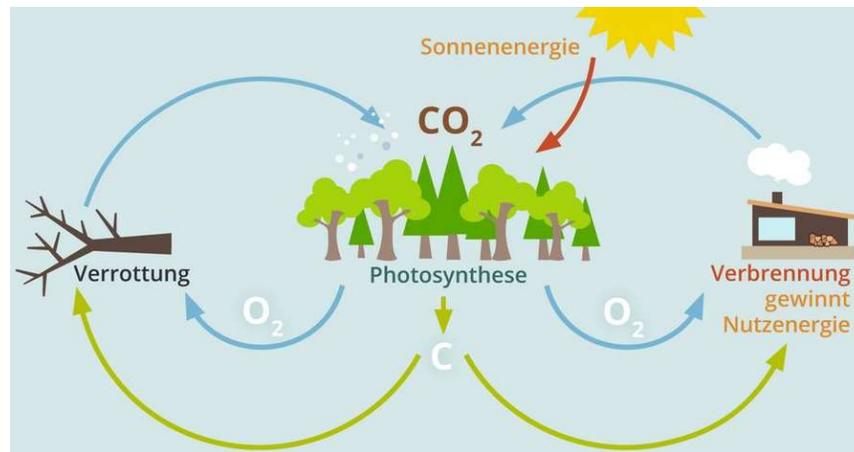


Abbildung 3.1-1: CO_2 -Kreislauf [5]

Beim Einsatz biogener Brennstoffe kommt es kaum zu einer Erhöhung von klimaschädlichen Treibhausgasen, was im direkten Gegensatz zu fossilen Energieträgern steht. Primär handelt es sich bei den Treibhausgasen um Kohlendioxid (CO_2), welches bei der vollständigen Verbrennung von Kohlenstoff (C) entsteht. Dies geschieht ebenso bei der Verbrennung von Biomasse, jedoch mit dem Unterschied, dass ein nachhaltiger Anbau vorausgesetzt wird und somit keine zusätzlichen Mengen an CO_2 in die Atmosphäre freigesetzt werden. Dennoch kann man auch bei der Biomasse nicht von vollständiger Klimaneutralität sprechen, da bei der Herstellung, bzw. Bereitstellung biogener Brennstoffe, Maschinen und Feuerungsanlagen zum Einsatz kommen, welche teilweise ganzumfänglich mit fossilen Energieträgern hergestellt und betrieben werden. Dennoch muss es mittelfristig das Ziel sein, einen weitestgehend klimaneutralen Kreislauf durch nachhaltige Bewirtschaftung, verbunden mit bewussterem und ressourcenschonenderem Umgang mit unseren Energiequellen, zu schaffen.

3.1.3 Definition und Zusammensetzung

Für Biomasse finden sich eine Vielzahl von Definitionen und Begriffsbestimmungen, welche sich je nach Fachbereich und den damit verbundenen unterschiedlichen Sichtweisen mehr oder weniger stark unterscheiden. Weit gefasst bezeichnet Biomasse die Gesamtheit der durch Pflanzen und Tiere erzeugten und anfallenden Substanzen. [6]

Im Kontext der erneuerbaren Energie versteht man unter dem Begriff der Biomasse alle organischen Stoffe (d.h. kohlenstoffhaltige Materie) biogener, nicht fossiler Art, die als Energieträger genutzt werden. Dies umfasst somit wachsende und lebende, bzw. abgestorbene Materie pflanzlichen oder tierischen Ursprungs und die daraus resultierenden Rückstände bzw. Abfallstoffe. Zur Nutzung als Energieträger werden besonders oft sehr schnell wachsende und resistente Pflanzenarten gewählt, welche ohne aufwendiger Pflege an die ökologischen Bedingungen (Temperatur, Boden, Niederschlag) des jeweiligen Standortes angepasst sind und somit entsprechend gut wachsen können. Zweck, dieser gezielten Biomasseproduktion, ist die Sicherstellung einer möglichst hohen Ausbeute an biogenem Festbrennstoff. Generell können die industriell gesteuerten Anbausysteme in Forst, Grünland sowie Ackerbau unterteilt werden. [4]
[7]

Des Weiteren gilt die Definition der Biomasse auch für all jene Stoffe, welche durch technische Prozesse und Umwandlungen erzeugt werden, bzw. bei stofflicher Nutzung als Reststoffe anfallen. Die Abgrenzung der Biomasse zu den fossilen Energieträgern markiert der Torf als fossiles Sekundärprodukt der Verrottung und wird somit nicht mehr zum allgemein als Biomasse bezeichneten Energieträger gezählt. Jedoch gibt es länderspezifische Unterschiede, wo Torf durchaus der Biomasse zugeordnet wird. [8]

Die Elemente Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O) und Wasserstoff (H) bilden deutlich über 90% der Gesamttrockenmasse, wobei Wasserstoff mit ca. 6% angegeben werden kann. Je nach Pflanzenart (Land- oder Wasserpflanzen) gelangen auf unterschiedliche Weise und durch Aufnahme von Kohlenstoffdioxid (CO₂), Wasser (H₂O), sowie in geringerem Ausmaß Sauerstoff, die genannten Hauptelemente (C, O, H) in die Pflanze. Neben den Hauptelementen finden sich auch noch eine Vielzahl weiterer Elemente, die sogenannten Pflanzennährstoffe, welche je nach Mengenbedarf in Makro- und Mikronährstoffe unterteilt werden. Die in größerer Menge benötigten Elemente werden als Hauptnährelemente (Makroelemente) und jene in geringerer Menge benötigten Elemente als Spurenelemente (Mikroelemente) bezeichnet. Die sechs Hauptnährstoffelemente sind Stickstoff (N), Kalium (K), Phosphor (P), Kalzium (Ca), Magnesium (Mg) und Schwefel (S)

KAPITEL 3 – GRUNDLAGEN

und stellen bis zu 5% der Pflanzentrockensubstanz dar. Als Vertreter der Mikronährstoffe, welche in einer Konzentration von bis zu 0,03% der Trockensubstanz enthalten sein können, sind Bor (B), Mangan (Mn), Eisen (Fe), Kobalt (Co), Kupfer (Cu), Zink (Zn), Molybdän (Mo), Natrium (Na) und das relativ häufig vorkommende Chlor (Cl) zu nennen, wobei die aufgenommene Menge an Metallen stark vom Standort abhängig sein kann. Eisen (Fe) kann sowohl zu den Makro- als auch Mikronährstoffen gezählt werden. [8]

Die über die Pflanzennährstoffe aufgenommenen Elemente bilden durch den pflanzlichen Stoffwechsel zahlreiche unterschiedliche Verbindungen. Die wichtigsten organischen Stoffwechselprodukte stellen hier die Kohlenhydrate (Cellulose, Hemicellulose, Zucker, Stärke), sowie Fette und Proteine (Lignin) dar. [8]

Eine Illustration der Bildung sowie Zusammensetzung der Pflanzentrockensubstanz gibt Abbildung 3.1-2.

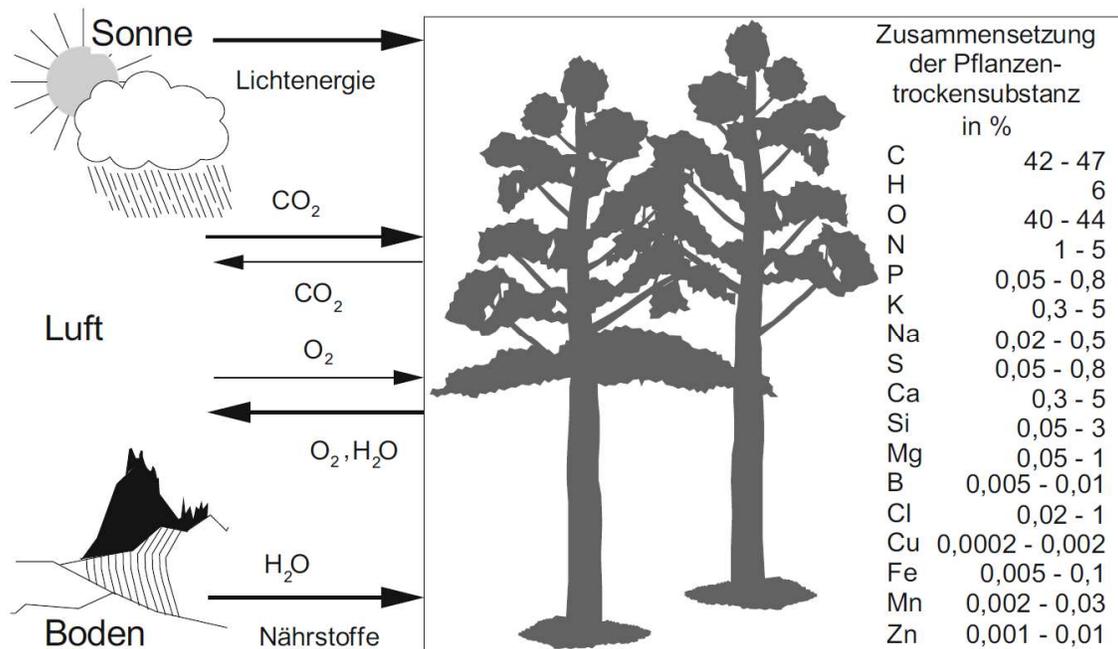


Abbildung 3.1-2: Zusammensetzung und Bildung der Pflanzensubstanz [8]

3.1.4 Einteilung

Biomasse kann, nach ihrer Definition, zusätzlich in primäre und sekundäre Biomasse unterteilt werden, wobei hier Bezug auf die jeweilige Entstehung genommen wird. So handelt es sich bei primärer Biomasse im Wesentlichen um die gesamte Pflanzenmasse aus Land- und Forstwirtschaft, inklusive aller abgestorbenen Rückstände und Nebenprodukte, welche durch Photosynthese entstanden sind. Bei sekundärer Biomasse findet der Abbau und Umbau der organischen Substanz in höhere Organismen (z.B. Tiere) statt und nur indirekt durch Sonnenenergie. Hierzu zählen z.B. die gesamte Zoomasse sowie Exkreme. Des Weiteren kann auch noch in tertiäre Biomasse unterteilt werden, wobei es sich hier um weiterverarbeitete primäre, bzw. sekundäre Biomasse durch technische Umwandlungsschritte handelt. Beispiele hierfür sind u.a. Papier und Baumwollkleidung. [8]

Weitere und je nach Anwendungsbereich oftmals genutzte Einteilungen von Biomasse sind beispielsweise in holzgutartige (Holz), bzw. halmgutartige (Gras, Schilf) Biomasse oder auch die Unterteilung in nachwachsende Rohstoffe (Getreide, Zuckerrüben), Reststoffe (Stroh, Gülle) und Abfälle (Klärschlamm, Hausmüll).

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass aus Biomasse unterschiedliche Bioenergieträger gewonnen werden. Dabei wird Biomasse entweder direkt zur Energiegewinnung eingesetzt oder durch Umwandlungsprozesse (thermochemisch, physikalisch-chemisch, biochemisch) in einen festen, flüssigen oder gasförmigen Energieträger umgesetzt und zur Bereitstellung von Strom, Wärme oder zur Kraftstoffgewinnung genutzt. [4]

Beispiele für Bioenergieträger unterteilt nach Aggregatzustand sind in Abbildung 3.1-3 dargestellt.

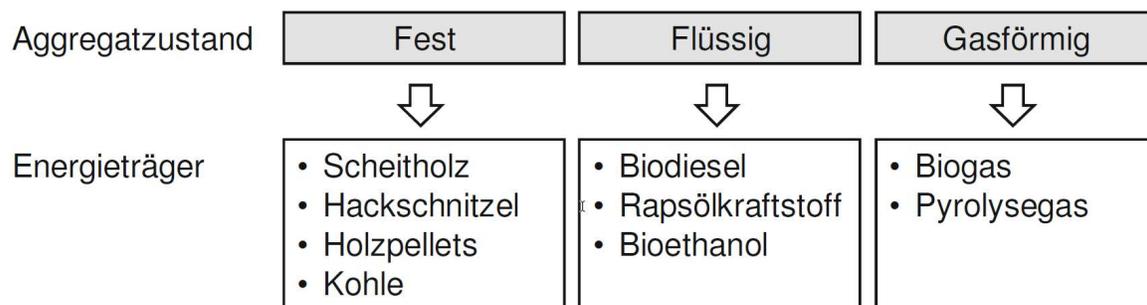


Abbildung 3.1-3: Bioenergieträger nach Aggregatzustand [4]

Des Weiteren wird die Klassifizierung biogener Brennstoffe nach Norm DIN EN ISO 17225-1, neben den üblichen Hauptgruppen von holz- bzw. halmgutartige Biomasse auch noch in Biomasse von Früchten, aquatische Biomasse sowie definierte und undefinierte Mischungen unterschieden [9]. Außerdem beschreibt diese Norm eine Spezifikation der festen biogenen Brennstoffe auf Grundlage von Handelsformen und Eigenschaften. Streng nach Definition bildet diese Norm eine sehr gute Basis, um Biomasse möglichst genau zu klassifizieren und eine damit verbundene einheitliche Einteilung zu schaffen.

3.1.5 Pflanzennährstoffe und Elementgehalte

3.1.5.1 Hauptelemente

Kohlenstoff, Sauerstoff und Wasserstoff bilden im Wesentlichen die Hauptbestandteile fester pflanzlicher Biomasse. Der Kohlenstoff bestimmt dabei weitestgehend den Energiegehalt bzw. die freigesetzte Energie durch deren Oxidation. Wasserstoff, der anteilmäßig die kleinste Menge dieser drei stellt, liefert ebenso einen entsprechenden Beitrag zur Energiemenge, währenddessen Sauerstoff nur den Oxidationsprozess vorantreibt. Den höchsten Gehalt an Kohlenstoff in der Trockenmasse weisen Holzbrennstoffe mit ca. 50% auf, während bei der Mehrzahl an Nicht-Holzbrennstoffen ein Kohlenstoffgehalt von rund 45% die obere Grenze markiert. Im Gegensatz zur Biomasse, weisen fossile Energieträger mehr Kohlenstoff, bzw. weniger Sauerstoff auf und resultieren ebenso in weniger flüchtige Bestandteile. [10]

3.1.5.2 Hauptnährstoffe

Diese Nährstoffe sind primär für das Pflanzenwachstum verantwortlich und beeinflussen dadurch maßgeblich die Qualität und den Ertrag der Pflanzen. Die sechs Hauptnährstoffe sind folgende:

Stickstoff (N): Ein wichtiges Element in Hinblick auf stoffwechselphysiologische Abläufe und einflussreichstes Element für das Wachstum der Pflanze. Pflanzen mit hohem Gehalt an Eiweiß weisen in der Regel auch einen entsprechend höheren Gehalt an Stickstoff auf, verglichen mit Lignocellulosepflanzen wie Holz und Stroh. Außerdem variiert der Stickstoffgehalt innerhalb der unterschiedlichen Biomassearten zum Teil sehr stark. Der Stickstoffgehalt wirkt sich direkt auf die Bildung von Stickstoffoxid (NO_x) aus, da dieses Element nahezu gänzlich in die Gasphase übergeht. [10]

Kalium (K): Unterschiede an Kaliumgehalt der Biomasse lassen sich ableiten durch das Düngeverhalten sowie Standort. Regelmäßig gedüngte Feldkulturen weisen demnach einen entsprechend höheren Gehalt an Kalium auf als meist nicht-gedüngte Holzkulturen. Kalium steigert das Pflanzenwachstum und ist demnach ein guter Dünger. Vermehrt findet sich Kalium in Stängeln und Blättern der Pflanzen. Holzbrennstoffe zeigen Kaliumgehalte von rund 0,35% auf, während Halmgutbrennstoffe meist deutlich mehr, nämlich rund 1%, aufweisen können. Ein weiterer Effekt der den resultierenden Kaliumgehalt beeinflusst, ist neben unterschiedlicher Düngung, der gute Auswascheffekt von Niederschlägen nach der Ernte. Kalium beeinflusst auch das Ascheschmelzverhalten, indem der Schmelzpunkt mit steigendem Kaliumgehalt erniedrigt wird. [8] [10]

Kalzium (Ca), Magnesium (Mg), Phosphor (P): Kalzium wirkt auf das Erweichungsverhalten der Asche erhöhend, während Magnesium eine Senkung des Ascheschmelzpunktes bewirkt. Dies wird genutzt, um ungünstiges Ascheschmelzverhalten dem Anwendungsfall entsprechend zu begünstigen, indem kalziumhaltige Zuschlagstoffe, wie z.B. Kalk, zugegeben werden, um den Schmelzpunkt zu erhöhen. Des Weiteren entsteht durch die chemische Umwandlung von Kalzium- und Schwefelverbindungen das Kalziumsulfat (Gips), was zur Folge hat, dass Schwefel in der Asche verbleibt und nicht als SO_2 im Abgas wiederzufinden ist. Kalzium, Magnesium sowie Phosphor erhöhen allesamt den Düngewert der anfallenden Asche. [10]

Schwefel (S): Schwefel ist ein häufiger Begleitstoff in Düngemitteln wobei bei Feldkulturen ein deutlich höherer Schwefelgehalt festzustellen ist als bei meist nicht-gedüngten Waldkulturen. Der Schwefelgehalt bestimmt auch die Emissionen an Schwefeldioxid (SO_2) bei der thermo-chemischen Umwandlung. Schwefel kann auch indirekt Korrosion bei den Wärmeübertragerflächen verursachen oder begünstigen, indem es während der Abkühlung der Abgase im Abhitzeessel zu Rückkondensation kommt und an mitgeführten Flugaschepartikeln oder direkt an den Kesselwänden abgelagert wird. Grundsätzlich ist schwefelarmer Brennstoff zu bevorzugen. [10]

3.1.5.3 Mikronährstoffe und Spurenelemente

Neben den aufgezählten Hauptelementen bzw. -nährstoffen gibt es eine Reihe von Spurenelementen von denen einige lebensnotwendige Mikronährstoffe darstellen. Die Mehrzahl an Spurenelementen sind Schwermetalle welche vor allem die Eigenschaften hinsichtlich Qualität der anfallenden Asche bei der thermo-chemischen Umwandlung bestimmen.

Chlor (Cl): Chlor ist nicht als Nährstoff zu bezeichnen, sondern ist ein bedeutender Begleitstoff in Düngemitteln und ebenfalls am stofflichen Aufbau der Biomasse beteiligt. Der Chlorgehalt in Holzbrennstoffen ist sehr gering und liegt zwischen 0,005 bis 0,02%, dennoch ist Chlor ein relativ häufig vorkommendes Element in Biomassen. Die relativ hohe Schwankungsbreite an Chlorgehalt liegt zum einen an den unterschiedlichen Düngemittel bzw. -methoden sowie dem Standort (z.B. Küstennähe) und zum anderen an der Auswaschung infolge von Niederschlag. Chlor kann, gleich wie bei Schwefel, korrosiv an den Oberflächen der Wärmetauscherflächen und Kesselwänden wirken. [10]

Bor (B): Bor ist wichtig für die Stabilität der Stängel bzw. wirkt stabilisierend für die Zellwände und Membranen. [8]

Schwermetalle wie Arsen (As), Cadmium (Cd), Blei (Pb), Kobalt (Co), Eisen (Fe), Quecksilber (Hg), Mangan (Mn), Molybdän (Mo), Nickel (Ni), etc.: Schwermetalle können, durch entsprechende Prüfung der angefallenen Asche, eine erste Auskunft über die Herkunft des Brennstoffes geben und stellen somit ein Merkmal zur Unterscheidung von naturbelassenen und nicht-naturbelassenen Brennstoffen dar. Ebenso ist eine starke Standortabhängigkeit (Industrienähe, Straßennähe, Berg, Tal) gegeben, was wiederum eine zum Teil stark variierende Schwankungsbreite zur Folge hat. Langsam wachsende Holzbrennstoffe haben gegenüber den jährlich erntebaren Pflanzen, also schnellwachsenden Kulturen, meist eine deutlich höhere Belastung an Schwermetallen. Einige Schwermetalle wie Quecksilber, Cadmium oder Blei sind relativ leicht flüchtig und re-kondensieren oftmals an den Flugaschepartikeln, was einen entsprechenden Anstieg an Schwermetallen in der Flugasche widerspiegelt. Die leicht flüchtigen Bestandteile müssen vor Austrag entsprechend gebunden werden, da sonst Grenzwerte überschritten werden. Schwermetalle beeinflussen primär die Qualität der Asche und bleiben zum größten Teil im Verbrennungsrückstand zurück. Die Aschequalität stellt auch einen wirtschaftlichen Faktor dar, da nur möglichst reine Asche zur Düngung genutzt und ausgetragen werden kann. [8] [10]

Eng verbunden mit der jeweiligen Elementarzusammensetzung sind die entsprechenden Auswirkungen auf die Kenngrößen zur Charakterisierung fester Brennstoffe in Zusammenhang mit der thermo-chemischen Umwandlung zur energetischen Nutzung. Nachfolgende Tabelle soll dies zusammengefasst darstellen.

Tabelle 3.1-1: Elemente biogener Festbrennstoffe und deren Auswirkung [10]

Qualitätsmerkmal	Auswirkung
Kohlenstoff (C)	Heizwert, Brennwert, Luftbedarf, Partikelemissionen
Wasserstoff (H)	Heizwert, Brennwert, Luftbedarf
Sauerstoff (O)	Heizwert, Brennwert, Luftbedarf
Stickstoff (N)	NO _x - und N ₂ O-Emissionen
Kalium (K)	Ascheerweichungsverhalten, Hochtemperaturkorrosion, Partikelemissionen
Magnesium (Mg)	Ascheerweichungsverhalten
Kalzium (Ca)	Ascheerweichungsverhalten, Ascheverwertung, Partikelemission
Schwefel (S)	SO ₂ -Emissionen, Hochtemperaturkorrosion
Chlor (Cl)	Hochtemperaturkorrosion, Partikelemission, Emission von HCl
Schwermetalle	Ascheverwertung, Schwermetallemission

3.1.6 Energieträgerspezifische Eigenschaften

Die nachfolgend beschriebenen Kenngrößen sind wichtige Größen zur Charakterisierung von Brennstoffen und geben Auskunft über deren energieträgerrelevanten Eigenschaften, welche vor allem für die thermo-chemische Umwandlung von Bedeutung sind.

Wassergehalt und Brennstoff-Feuchte: Als Wassergehalt bezeichnet man den Anteil an Wasser, welcher in der feuchten Biomasse enthalten ist. D.h. der Wassergehalt wird auf die Gesamtmasse bezogen, welche sich aus der trockenen Biomasse (Trockenmasse) und der darin enthaltenen Wassermasse zusammensetzt. Im Gegensatz dazu bezeichnet die Brennstoff-Feuchte das Verhältnis des enthaltenen Wassers zur absoluten Trockenmasse und ist definiert als die im trockenen Brennstoff gebundene Wassermenge. Der Wassergehalt ist die bestimmende Einflussgröße für den Heizwert und in weiterer Folge erforderliche Brennstoffmenge. Die im Brennstoff enthaltene Feuchte muss bei der thermo-chemischen Umwandlung entsprechend verdunstet werden und verringert die gesamt freigesetzte Energiemenge um die dafür aufgebrauchte Wärmemenge. Ebenso hat der Wassergehalt, durch biologische Prozesse im Brenngut, bei einem Wert von über 16% einen heizwertmindernden Einfluss. [10]

Heizwert: Der Heizwert trockener biogener Festbrennstoffe wird primär durch den Anteil an oxidierbaren Elementen (z.B. Kohlenstoff und Wasserstoff) bestimmt und bezeichnet jene Wärmemenge, welche bei vollständiger Oxidation ohne Berücksichtigung der Kondensationswärme des Wasserdampfes im Abgas freigesetzt wird. D.h. das Wasser liegt nach

der Verbrennung in dampfförmigem Zustand vor. Nachdem der Wassergehalt wesentlich stärkeren Einfluss auf den Heizwert nimmt als die Art der Biomasse, wird der Heizwert für absolut trockene Biomassen verglichen. [11]

Brennwert: Der Brennwert unterscheidet sich vom Heizwert lediglich durch die Berücksichtigung der Kondensationswärme des Wasserdampfes, d.h. Wasser liegt im flüssigen Zustand vor. Aus dem genannten Grund liegt der Brennwert über dem Heizwert und der relative Abstand vergrößert sich bei zunehmendem Wassergehalt der Biomasse. [11]

Flüchtige Bestandteile: Unter dem Begriff der flüchtigen Bestandteile versteht man die gasförmig entweichenden Zersetzungsprodukte der organischen Brennstoffsubstanz bei Erhitzung, durchgeführt unter festgelegten Bedingungen. Zumeist bilden brennbare Gase den flüchtigen Anteil und müssen bei der Auslegung von Verbrennungsanlagen (Dimensionierung) entsprechend berücksichtigt werden. Der durchschnittliche Anteil an Flüchtigen liegt bei Holzbrennstoffen bei rund 82% und bei halmgutartiger Biomasse im Bereich von 75%. [10]

Aschegehalt: Die Asche verdünnt im erweiterten Sinne den brennbaren Anteil und verringert so den Gesamtheizwert, da es sich um die nicht brennbare Substanz des Brennstoffes handelt. Ebenso ist die Angabe des Aschegehalts eine wesentliche Größe in Hinblick auf die technische Auslegung einer Feuerungsanlage, bzw. im speziellen für Entstaubungs- und Aschetranporteinrichtungen. D.h. je mehr Asche anfällt, desto höher ist die Staubfracht und umso wichtiger wird eine gute Abscheidung des inerten Materials. Die Bestandteile der Asche sind vorwiegend Kalzium (Ca), Magnesium (Mg), Kalium (K), Phosphor (Ph) und Natrium (Na). [10] [11]

Zusammengefasst können folgende Auswirkungen zur jeweiligen Einflussgröße genannt werden.

Tabelle 3.1-2: Energiespezifische Eigenschaften [10]

Qualitätsmerkmal	Auswirkung
Wassergehalt	Heizwert, Lagerfähigkeit, Selbstentzündung, Brennstoffgewicht
Heizwert	Energiegehalt, Anlagenauslegung, Verbrennungstemperatur
Aschegehalt	Partikelemissionen (Staub), Rückstandsbildung (Schlacke)

3.1.7 Physikalisch-Mechanische Eigenschaften

Eine weitere Möglichkeit zur Klassifizierung biogener Brennstoffe stellen die physikalisch-mechanischen Eigenschaften dar. Überblicksmäßig werden diese hier in tabellarischer Form angeführt und den zu beachtenden Auswirkungen gegenübergestellt. Oftmals müssen einige dieser Eigenschaften schon vorab als gegeben hingenommen werden, wie z.B. in welcher Form (Stückgröße, gehacktes Brenngut, Pellets) die Biomasse vorhanden sein wird. Dem entsprechend gestalten sich weitere Überlegungen in Bezug auf Förderapparate, Lagerung und anderen mechanischen Einrichtungen.

Tabelle 3.1-3: Physikalisch-mechanische Eigenschaften [10]

Qualitätsmerkmal	Auswirkung
Stückigkeit (Abmessungen, Geometrie)	Zuordnung zu mechanischen Systemen und Feuerungs-, Vergasungs- und Pyrolyseanlagentypen, Aufbereitungsbedarf
Größenverteilung (Feinanteil)	Störungen in Förderelementen (langfasriges Gut), Rieselfähigkeit, Brückenbildungsneigung, Belüftungs- und Trocknungseigenschaften, Staubentwicklung
Brückenbildung	Rieselfähigkeit, Störungen bei Umschlagprozessen
Schütt- bzw. Lagerdichte	Lager- und Transportaufwendungen, Leistung der Förderelemente, Vorratsbehältergröße
Rohdichte (Teilchendichte)	Schütt- und Lagerdichte, Pneumatische Fördereinrichtungen, Brenneigenschaften (spez. Wärmeleitfähigkeit, Entgasungsrate)
Abriebfestigkeit	Feinanteil (Staubentwicklung, Entmischung)

3.1.8 Elementaranalyse und Physio-chemische Eigenschaften

Neben der Art der Biomasse und dessen physikalisch-mechanischen Eigenschaften hat die elementare Zusammensetzung einen wesentlichen Einfluss auf das Verhalten im thermo-chemischen Prozess. Im Folgenden werden Literaturdaten von Elementaranalysen verschiedener Biomassen gelistet, um die große Bandbreite an Elementen als auch Anteilen innerhalb der verschiedenen Pflanzenarten zu verdeutlichen.

Tabelle 3.1-4: Brennstoffanalysen in Masse-% Trockenmasse [12]

Biomasse*	Weichholz	Zuckerr.- bagasse	Schilf	Palmen- blätter	Weizen- kleie
Wassergehalt**	6,11	11,52	7,95	17,52	6,65
Aschegehalt	0,29	5,89	9,30	6,53	9,13
Kohlenstoff (C)	50,23	46,18	46,08	48,47	45,07
Wasserstoff (H)	6,04	5,55	5,17	5,06	5,55
Stickstoff (N)	0,05	0,38	0,60	1,14	2,85
Schwefel (S)	0,005	0,03	0,10	0,09	0,19
Chlor (Cl)	0,003	0,02	0,10	0,42	0,04
Sauerstoff (O)	43,38	41,95	38,65	38,29	37,17
flüchtige Best.teile	86,45	81,59	75,44	72,14	76,76

* Biomasse in pelletierter Form

** in Masse-% gemessen

Tabelle 3.1-5: Ascheanalysen in Masse-% Trockenmasse [12]

Biomasse	Weichholz- pellets	Zuckerr.- bagasse	Schilf- pellets	Palmen- blätter	Weizen- kleie
Al ₂ O ₃	1,01	14,14	1,64	1,41	0,36
CaO	58,03	4,45	4,60	35,78	29,41
Cl	0,99	0,10	0,29	0,46	0,48
Fe ₂ O ₃	5,29	19,47	1,73	3,10	0,59
K ₂ O	13,16	2,90	3,41	8,16	20,81
MgO	5,22	2,71	3,15	0,36	0,38
Na ₂ O	4,70	0,84	1,84	1,44	1,45
P ₂ O ₅	1,17	1,07	0,86	2,00	33,82
SiO ₂	3,17	46,61	79,95	40,58	1,57
SO ₃	5,47	0,56	1,90	1,16	1,08
TiO ₂	0,09	6,29	0,27	0,41	0,05

Hinweis: Röntgenfluoreszenzanalyse der Brennstoff-Aschen (Auszug der anteilmäßig relevantesten Substanzen)

3.2 Thermo-chemische Umwandlungsprozesse

Bei der thermo-chemischen Umwandlung biogener Festbrennstoffe findet ein chemischer Umwandlungsprozess statt mit dem Ziel, thermische Energie bereitzustellen. Der Prozess lässt sich in vier Phasen nach Abbildung 3.2-1 unterteilen, welche in der realen Umsetzung mehr oder weniger stark parallel als hintereinander folgend, ablaufen. Grundlegend lassen sich die vier Phasen durch deren zunehmenden Oxidationsgrad, Temperaturbereich und Luftüberschusszahl charakterisieren. In weiterer Folge wird hier näher auf die Vergasungs- und Verbrennungstechnik eingegangen, welche auch die Hauptanwendungsgebiete der im Zuge dieser Arbeit aufgebauten Apparatur darstellen.

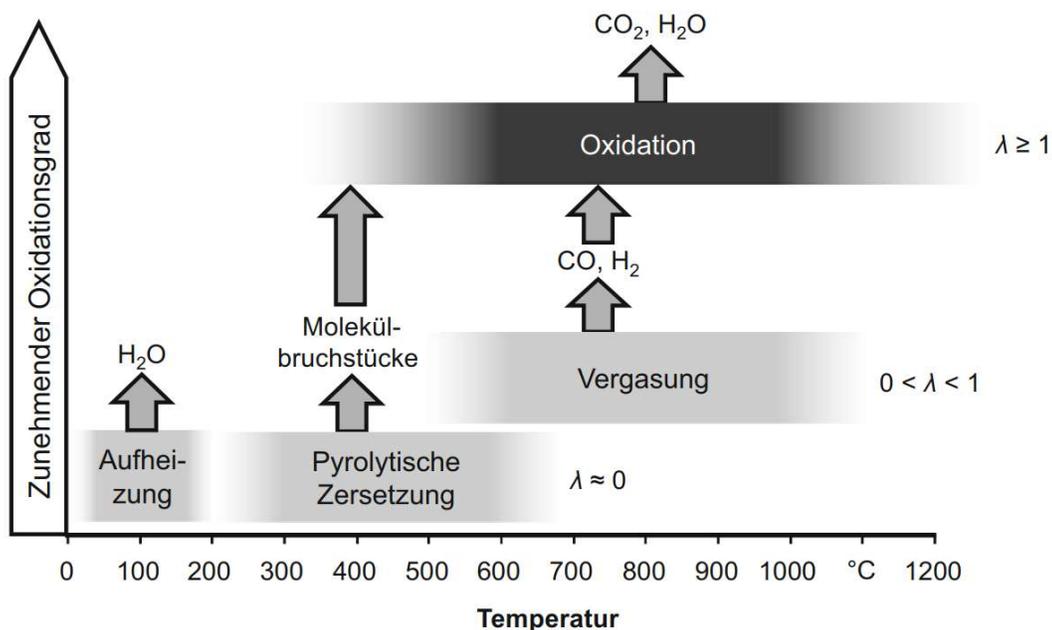


Abbildung 3.2-1: Ablauf und Phasen der thermo-chemischen Umwandlung [8]

Am Ende eines in Abbildung 3.2-1 dargestellten thermo-chemischen Prozesses steht die vollständige Oxidation aller brenn- bzw. oxidierbaren Bestandteile der Biomasse. Dabei kann, im Gegensatz zur direkten Umwandlung (Verbrennung, Oxidation) unter Freisetzung von Wärme, die Aufoxidierung auch indirekt über Zwischenstufen (Pyrolyse und Vergasung) stattfinden und damit sogenannte Sekundärenergieträger erzeugt werden. Im Vergleich zur Verbrennung, einem exothermen Prozess, spricht man bei der Vergasung insgesamt von einem endothermen Vorgang. [8]

3.3 Vergasungstechnik

3.3.1 Grundlagen der Vergasung

Die Vergasung stellt einen thermo-chemischen Prozess dar, bei der feste Biomasse in ein Produktgas umgewandelt wird. Nach Abbildung 3.3-1 findet, durch Zufuhr von Wärme, die Aufheizung und Trocknung statt, bei der das freie und zellgebundene Wasser entweicht. Wird unter Luftausschluss weiter erhitzt, setzt ab einer Temperatur von rund 200°C, die pyrolytische Zersetzung ein, bei der organische Makromoleküle irreversibel aufgebrochen werden. In dieser Phase entsteht üblicherweise, bedingt durch die starke Entgasung bzw. Entwicklung flüchtiger Bestandteile, kein Kontakt zwischen den Partikeln und der umgebenden Atmosphäre. Bei diesem Zersetzungsprozess entstehen, abhängig von der Temperatur, unterschiedlich hohe Anteile an festen (Biomassekoks), flüssigen (Pyrolyseöl) oder auch gasförmigen (Brenngas) Produkten. Die eigentlichen Vergasungsreaktionen finden unter Zugabe eines Vergasungsmittels bei Temperaturen ab rund 700°C statt. [8]

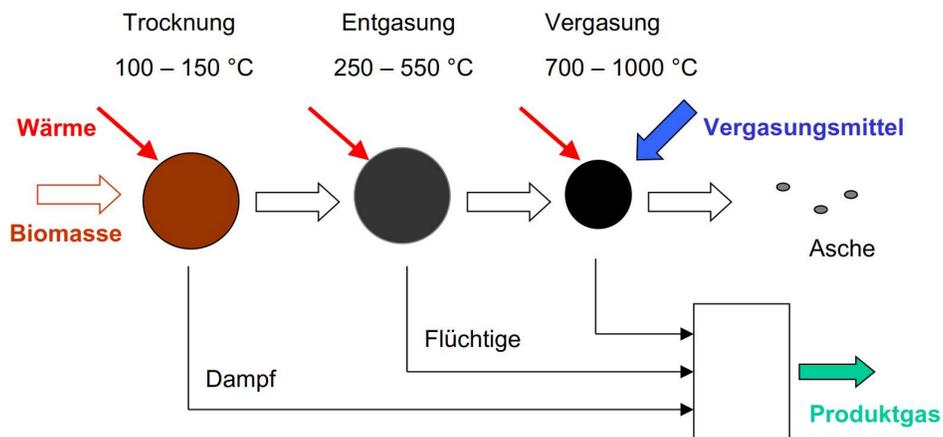


Abbildung 3.3-1: Vorgänge bei der Vergasung [8]

Die bei der pyrolytischen Zersetzung entstandenen Produkte werden nun bei der Vergasung durch weitere Zufuhr von (externer) Wärme und in Gegenwart eines Vergasungsmittels in Reaktion gebracht. Der insgesamt als endotherm betrachtete Vergasungsprozess ergibt sich aus der sehr dominierenden heterogenen Wassergas-Reaktion und Boudouard-Reaktion, welche entsprechend stark endotherm sind. Die stattfindenden, temperatur- und druckabhängigen, Reaktionen werden nachfolgend wiedergegeben. [8]

Tabelle 3.3-1: Vergasungsreaktionen [8]

Heterogene Vergasungsreaktionen		
Vollständige Kohlenstoffoxidation ⁽¹⁾	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	$\Delta H = -393,5 \text{ kJ/mol}$
Partielle Kohlenstoffoxidation ⁽²⁾	$C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO$	$\Delta H = -110,5 \text{ kJ/mol}$
Heterogene Wassergas-Reaktion ⁽³⁾	$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$	$\Delta H = +118,5 \text{ kJ/mol}$
Boudouard-Reaktion ⁽⁴⁾	$C + CO_2 \rightarrow 2CO$	$\Delta H = +159,9 \text{ kJ/mol}$
Hydrierende Vergasung ⁽⁵⁾	$C + 2H_2 \rightarrow CH_4$	$\Delta H = -87,5 \text{ kJ/mol}$
Homogene Vergasungsreaktionen		
Wassergas-Shift Reaktion ⁽⁶⁾	$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	$\Delta H = -40,9 \text{ kJ/mol}$
Methanisierungs-Reaktion ⁽⁷⁾	$CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$	$\Delta H = -203,0 \text{ kJ/mol}$
Reformierung von Kohlenwasserstoffen ⁽⁸⁾	$C_m H_n + m H_2 O \rightarrow m CO + (m + \frac{n}{2}) H_2$	

Die aus den heterogenen Fest-Gas-Reaktionen entstandenen Produktgase können in einem zweiten Reaktionsschritt weiter umgewandelt werden. Bei den beiden endothermen Reaktionen (3) und (4) verschiebt sich bei steigender Temperatur und sinkendem Druck das Reaktionsgleichgewicht zugunsten der Produktseite. Hingegen sich bei (5) das Gleichgewicht durch Erhöhung der Temperatur zuungunsten, und eine Druckerhöhung, aufgrund der Molverhältnisse, zugunsten der Produktseite hin verschiebt. [8]

3.3.2 Wärmeeinbringung

Grundsätzlich kann die Wärmebereitstellung für den Vergasungsprozess auf zwei unterschiedliche Arten erfolgen, der autothermen- (direkten) bzw. allothermen (indirekten) Wärmeeinbringung.

Autotherm: Die benötigte Wärme wird direkt im Vergasungsreaktor durch Teilverbrennung der eingesetzten Biomasse bereitgestellt. [8]

Allotherm: Die Wärme wird indirekt über einen Wärmeübertrager oder durch aufgeheizt zirkulierendes (umlaufendes) Bettmaterial (z.B. Wirbelschichtreaktor) bereitgestellt. [8]

3.3.3 Vergasungsmittel und Produktgas

Die Verwendung eines Vergasungsmittels wird primär dafür genutzt, um den aus der Pyrolyse zurückgebliebenen festen Kohlenstoff (C) in brennbares Gas (u.a. Kohlenmonoxid) thermisch umzusetzen. Dazu werden hauptsächlich die sauerstoffhaltigen Vergasungsmittel Luft bzw. Sauerstoff (O_2) und Wasserdampf (H_2O) verwendet. [8]

Der Einsatz des jeweiligen Vergasungsmittels hat wesentlichen Einfluss auf die Qualität des Produktgases. Wird beispielsweise nach Abbildung 3.3-2 Wasserdampf (H_2O) als Vergasungsmittel verwendet, so ist der Anteil an Stickstoff (N_2) bei null, im Gegensatz zum relativ hohen Inertanteil (N_2) beim Einsatz von Luft, was folglich den Heizwert des Produktgases entsprechend senkt. Die Hauptkomponenten des Produktgases setzen sich aus Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenstoffdioxid (CO_2), Wasserstoff (H_2), Methan (CH_4) und Wasserdampf (H_2O) zusammen. Abhängig vom Vergasungsverfahren zählen auch eine Reihe von unerwünschten Bestandteilen wie Teere, Staub und Asche hinzu. Die Produktgaszusammensetzung ist primär von der eingesetzten Biomasse, dem Vergasungsmittel, dem Druck- bzw. Temperaturniveau sowie der Reaktionszeit abhängig. [8]

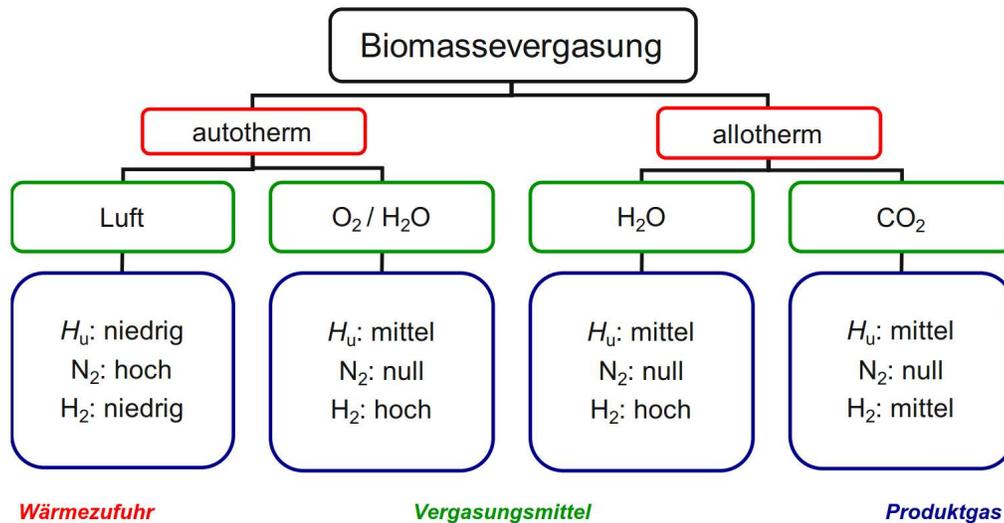


Abbildung 3.3-2: Vergasungskonzepte (modifiziert) [8]

Wie in Abbildung 3.3-2 gezeigt, kann eine Unterscheidung der Vergasungskonzepte nach Art der Wärmeerbringung und dem verwendeten Vergasungsmedium erfolgen. Des Weiteren gibt es noch eine Unterscheidung hinsichtlich fluiddynamischen Bedingungen sowie Druckniveau, was im nachfolgenden Kapitel 3.3.4 näher erläutert wird.

3.3.4 Arten von Vergasern

Eine Unterscheidung der Vergasertechnologien kann grundlegend nach den fluiddynamischen Bedingungen erfolgen, d.h. nach der Strömungsgeschwindigkeit des Gases durch die Feststoffschicht. Abbildung 3.3-3 zeigt diese Unterscheidung.

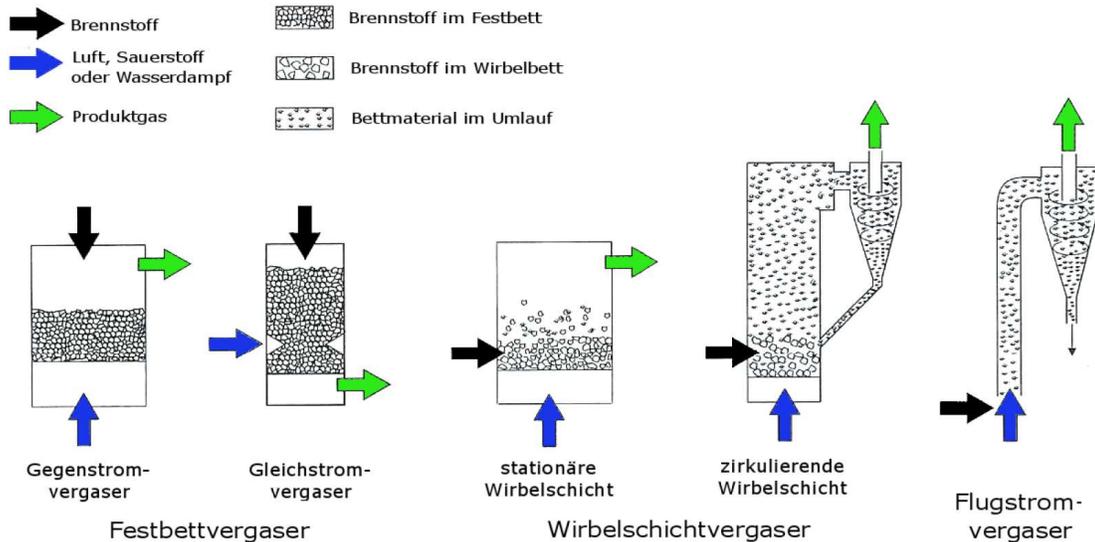


Abbildung 3.3-3: Vergasungssysteme, fluiddynamische Unterscheidung [8]

Im Folgenden wird auf die Vergasung mittels Wirbelschicht (WS) näher eingegangen, welche im Weiteren in stationäre-, zirkulierende, Ein- bzw. Zweibett Wirbelschichtvergasung unterteilt wird. Die in dieser Arbeit im Fokus stehende Wirbelschichtfeuerung wird, unter Bezugnahme zur Wirbelschichttechnik im Allgemeinen, in Kapitel 3.4 näher beschrieben und erläutert.

Stationär: Die Strömungsgeschwindigkeit durch das Vergaserbett liegt zwischen dem des Lockerungspunktes und der Schwebegeschwindigkeit (siehe dazu Kapitel 3.4). Dadurch stellt sich ein klar begrenztes Wirbelbett (blasenbildend) ein und es herrscht eine sehr gute Durchmischung von Vergasungsmittel (VM), Bettmaterial (z.B. Quarzsand definierter Körnung) und eingebrachtem Brennstoff (BS). Dabei liegt die Strömungsgeschwindigkeit des VM um ein Vielfaches über der Fluidisierungsgeschwindigkeit. Im sogenannten Freeboard (Freiraum über der WS) finden die Teilreaktionen der Vergasung statt. [8]

Zirkulierend: Die hier wesentlich höhere Fluidisierungsgeschwindigkeit im Vergasungsreaktor resultiert in einer nicht ganz gleichmäßigen ausgeprägten WS über die gesamte Reaktorhöhe (expandierte WS). Dennoch stellt sich eine weitestgehend homogene Reaktionszone mit konstanten Temperaturen ein, in der die Teilreaktionen parallel ablaufen können. Die in Folge

ausgetragene Partikelmenge aus Brennstoff und Bettmaterial am oberen Ende des Reaktors wird meist mittels Zyklon entsprechend wieder abgetrennt und in den Reaktor rückgeführt. Ein Nachteil ergibt sich im erhöhten anlagentechnischen Aufwand sowie der geringen Lastwechselflexibilität (An- bzw. Abfahrbetrieb). Eine, neben atmosphärischen Bedingungen möglichen, druckaufgeladene Betriebsführung (>20 bar), ermöglicht eine Verringerung der Baugröße bei gleicher Reaktorleistung. [8]

Einbett-WS: Die Fluidisierung des Bettmaterials erfolgt durch die Zufuhr des VM (bspw. Dampf und Sauerstoff), wobei eine direkte Vergasung stattfindet. Das aus dem Reaktor austretende Gemisch aus Produktgas, Bettmaterial und BS-Partikeln wird über einen Zyklon aufgetrennt und letztere beiden wieder in den Reaktorraum zurückgeführt. [8]

Zweibett-WS: Wie der Name es schon sagt, besteht diese Weiterentwicklung aus zwei räumlich getrennten WS-Reaktoren, welche jeweils stationär und/oder zirkulierend betrieben werden können. Dabei findet eine Zirkulation (Umlauf) des Bettmaterials zwischen den beiden Reaktoren statt, um die notwendige Wärme aus dem Verbrennungsreaktor, wo Biomasse-Koks und zusätzlich zugeführter Brennstoff verbrannt werden, in den Vergasungsreaktor zu transportieren. Folglich ist die im Verbrennungsreaktor vorherrschende Temperatur entsprechend höher gegenüber der im Vergasungsreaktor. Der Vorteil dieses Zweireaktor-Konzepts ist jener, dass die beiden Gasströme (Produktgas bzw. Abgas) nicht vermischt werden und separat verwendet werden können. Außerdem wird beispielsweise keine Luftzerlegungsanlage benötigt und dennoch kann ein hochwertiges und stickstoffreies Produktgas (z.B. Abscheidung des im Produktgasstrom enthaltenen H₂O) erzeugt werden. Das eben beschriebene Konzept sowie eine mögliche Reaktorausführung sind nachfolgend abgebildet. [8]

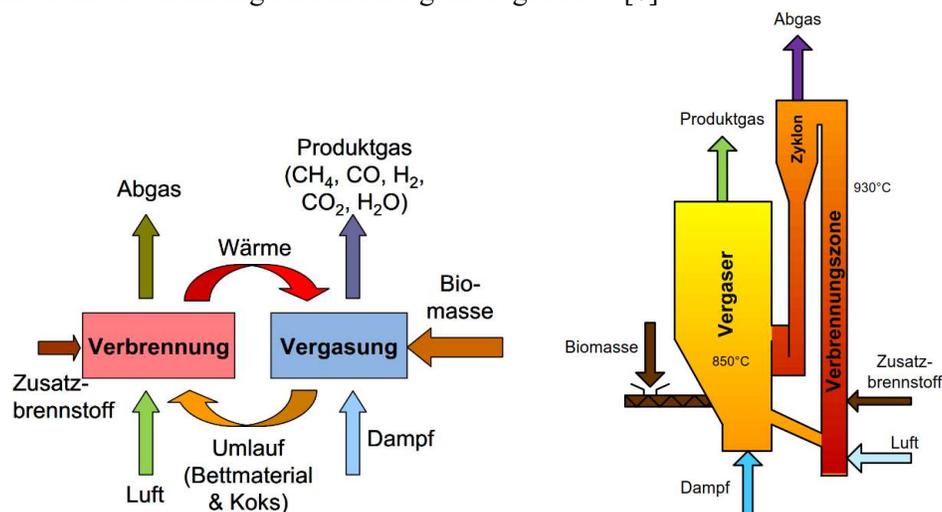


Abbildung 3.3-4: Zweibettreaktor-Konzept und Ausführung [10]

3.4 Verbrennungstechnik

Einen Überblick zur Wirbelschichtverbrennung (-feuerung) soll dieses Kapitel geben, beginnend mit den Grundlagen sowie den wichtigsten stattfindenden Reaktionen.

3.4.1 Grundlagen der Verbrennung

Oxidation: Die bei steigender Temperatur ablaufende Oxidation der Pyrolyse- und Vergasungsprodukte findet unter Luftüberschuss und Freisetzung von Wärme statt. Dabei entstehen, beim idealen Verbrennungsprozess, die Reaktionsprodukte CO_2 , H_2O sowie Ascherückstände des Brennstoffs. [8]

Tabelle 3.4-1: Oxidationsreaktionen [8]

$C + O_2 \rightarrow CO_2$	$\Delta H = -393,5 \text{ kJ/mol}$
$CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2$	$\Delta H = -283,0 \text{ kJ/mol}$
$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$	$\Delta H = -285,9 \text{ kJ/mol}$
$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	$\Delta H = -889,1 \text{ kJ/mol}$

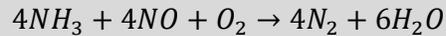
Entschwefelung: Bei der Verbrennung von schwefelhaltigen Brennstoffen kommt es zur Bildung von Schwefeldioxid (SO_2). Durch Zugabe von Kalkstein ($CaCO_3$) bindet das im ersten Schritt entstandene reaktionsfähige CaO bei Temperaturen von über $800^\circ C$ das SO_2 und es kommt folglich zu Entschwefelungsvorgängen bzw. können dadurch niedrigere SO_2 -Emissionen erreicht werden. [11]

Tabelle 3.4-2: Entschwefelungsmechanismus mit Kalkstein [11]

$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$	$\Delta H = +178,0 \text{ kJ/mol}$
$CaO + SO_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CaSO_4$	$\Delta H = -500,0 \text{ kJ/mol}$

NO_x -Emission: Hinsichtlich der NO_x -Bildung, kommt es hauptsächlich zur Bildung von Stickoxiden stammend aus dem Brennstoffstickstoff. Thermische Stickoxide treten aufgrund der niedrigen Verbrennungstemperaturen von unter $950^\circ C$ praktisch nicht auf. Eine Möglichkeit zur

Reduktion von NO_x-Emissionen stellt die selektive Nicht-Katalytische Reduktion (SNCR) dar. Hierbei wird das Reduktionsmittel (z.B. NH₃ - Ammoniak) in den heißen Abgaskanal eingedüst und dadurch Stickoxide (NO, N₂O) selektiv zu elementarem Stickstoff (N₂) zerlegt. [11] [13]



3.4.2 Wirbelschichtfeuerung

Grundsätzlich gibt es zwei unterschiedliche Systeme bei der Wirbelschichtfeuerung - die stationäre und zirkulierende WS. Beiden gemein ist der große Anteil an Inertmaterial (Bettmaterial). Der Brennstoffanteil liegt bei nur 1-3 Gew.-%. Außerdem beschränkt sich die Betriebsweise derzeit ausschließlich auf atmosphärisches Druckniveau. An druckaufgeladenen WS-Feuerungen wird intensiv geforscht, jedoch wurden diese bisher nur als Pilotanlagen ausgeführt. [11]

Stationäre WS-Feuerung [11]: Hierbei spricht man grundsätzlich von blasenbildenden Wirbelschichten (sh. Kapitel 3.5.2), bei welcher eine klar definierte Bettoberkante auszunehmen ist. Einsatz findet diese Form der Feuerung beispielsweise zur Strom- und Prozessdampferzeugung, mit entsprechend nachgeschalteten Anlagenteilen (z.B. Wärmeaustauscher, Rauchgasreinigung, etc.).

Die Fluidisierungsluft ist gleichzeitig auch die Verbrennungsluft und wird mittels unterschiedlich ausgeführten Anströmböden zugeführt. Eine Variante aus Luftverteilerrohren anstatt der Anwendung von Windboxen (sh. Kapitel 3.5.5) hat den Vorteil, unerwünschte Stoffe (z.B. grobe Bettaschen, Steine) aus dem Bettmaterial, durch Abziehen des Materials am unteren Ende des WS-Kessels, zu entfernen.

Eine grundlegende Unterscheidung gibt es bezüglich des Einsatzes von Tauchheizflächen. Dabei dienen diese zum Einstellen der Temperatur in der WS, welche der Verbrennungstemperatur gleichkommt. Die Tauchheizflächen müssen dazu direkt in der WS angebracht werden und sind demzufolge hohen mechanischen Belastungen (Erosion) ausgesetzt. Eine Weiterentwicklung stellt hierbei die Regelung der Verbrennungstemperatur mittels Primärluft dar, wodurch die Notwendigkeit von Tauchheizflächen nicht mehr gegeben ist. Die Fahrweise der Anlage mit $\lambda < 1$ im Bereich des Wirbelbettes setzt dennoch die Bedingung der ausreichend guten Fluidisierung voraus und Bedarf meist Maßnahmen zur effizienten Nachverbrennung (z.B. Abgasrezirkulation, Sekundärluft). Schematisch dargestellt findet sich diese Unterscheidung in Abbildung 3.4-1.

Die Einspeisung von festen Brennstoffen kann, abhängig von der Stückgröße, auf unterschiedliche Weise erfolgen. Beispiele dafür sind Schnecken, Rutschen, Gebläse- oder Wurfbeschickung verschiedenster Art. Beim Einsatz von Flüssig- oder Gasbrennstoffen, kommt noch die Sicherstellung der ausreichend langen Verweilzeit im Bett hinzu, was durch das Einbringen des Brennstoffes nahe dem Anströmboden, erreicht werden kann.

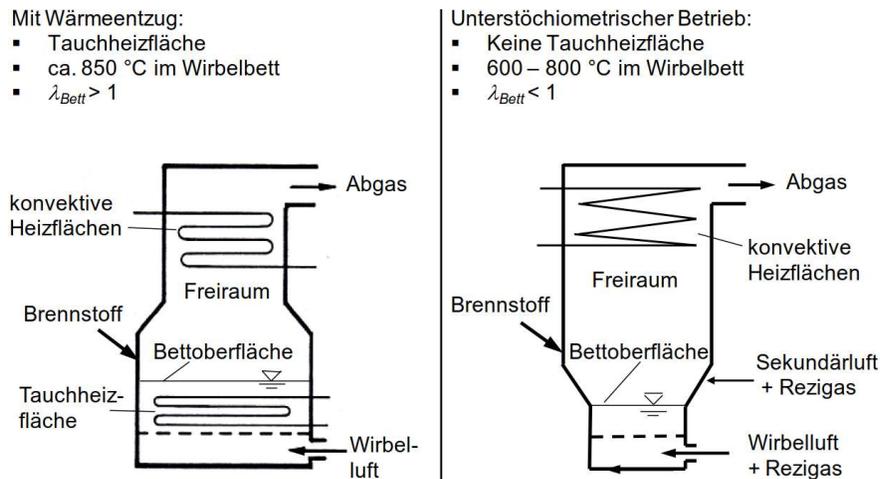


Abbildung 3.4-1: Arten der stationären WS-Feuerung (mit/ohne Tauchheizflächen) [11]

Zirkulierende WS-Feuerung [11]: Im Vergleich zur stationären WS-Feuerung wird bei zirkulierenden WS-Feuerungen mit deutlich höherer Gasgeschwindigkeit gearbeitet. Dabei ist keine klare Bettoberkante mehr erkennbar und die Gas-Feststoff-Phase ist über den gesamten Brennraum verteilt, mit einer dichteren Zone im unteren und einer feststoffärmeren Zone im oberen Bereich. Das oben, aus dem Reaktor, ausgetragene Bettmaterial muss vom Gasstrom abgetrennt (z.B. Zyklon) und diesem wieder rückgeführt werden.

Die Brennstoffzufuhr kann, ähnlich wie bei den stationären WS-Feuerungen, nahe dem Verteilerboden erfolgen oder aber auch über den zuvor abgetrennten und anschließend rückgeführten Feststoffstrom. Der Wärmeentzug aus der Wirbelschicht erfolgt hier, im Gegensatz zur Ausführung mit Tauchheizflächen bei der stationären WS-Feuerungen, mittels Kühlung der Kesselwände im oberen Bereich des Reaktors.

Die Zufuhr der Verbrennungsluft erfolgt in aufeinander abgestimmten Strömungen als Primär-, Sekundär- und zum Teil Tertiärluft, beginnend am Boden des Reaktors.

Die im Folgenden schematisch dargestellten Ausführungsbeispiele zeigen jeweils eine industriell genutzte stationäre bzw. zirkulierende Wirbelschichtfeuerung.

Abbildung 3.4-2 zeigt eine stationäre Wirbelschichtanlage zur Verbrennung von Biomasse und Abfallbrennstoffen mit offenem Düsenboden. Das Wirbelgas wird als Mischung von Primärluft und Rezirkulationsgas eingebracht. Zusätzlich erfolgt die Regelung über Sekundärluftebenen. Das Dosiersystem verfügt über mehrere Rückbrandsicherungen durch Überwachung von Temperatur, Unterdruck und Volumenstrom der Transportluft sowie einem Rückbrandschieber und der Möglichkeit der Wasserbedüsung. Der offene Düsenboden ermöglicht den Abzug von Grobteilen im Brennraum. Abbildung 3.4-3 zeigt im Detail die konstruktive Ausführung der Bettmaterialrückführung und Abzugsmöglichkeit der Grobanteile im Bettmaterial.

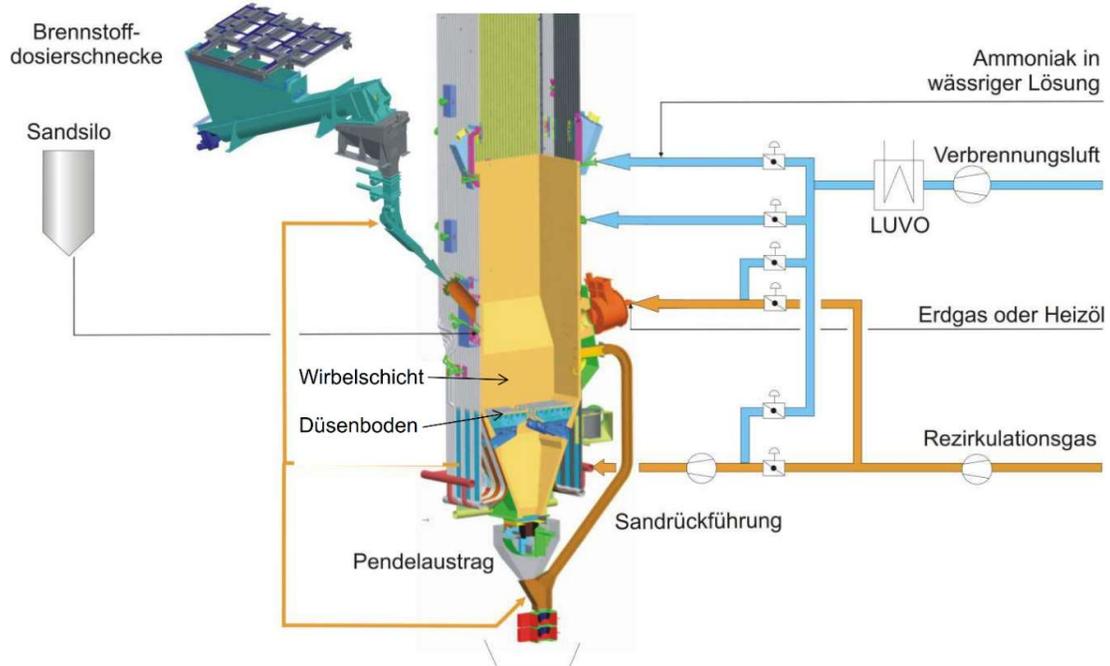


Abbildung 3.4-2: Stationäre Wirbelschichtfeuerung mit gestufter Verbrennung [54]

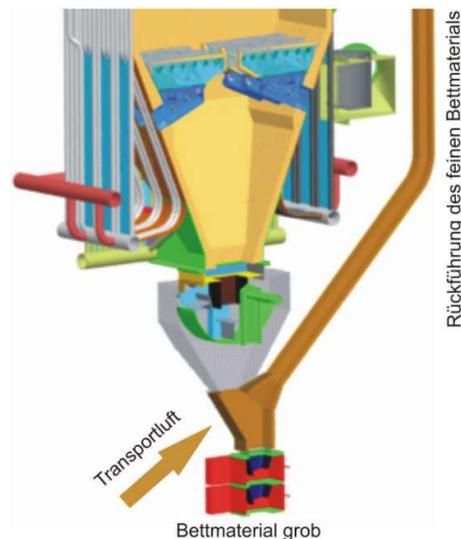


Abbildung 3.4-3: Ausführung für Bettmaterialaustrag und -rückführung [54]

Abbildung 3.4-4 zeigt eine zirkulierende Wirbelschichtfeuerung mit entsprechender Anordnung der Wärmetauscherflächen sowie Positionierung und Ausführung des Multi-Zyklons zur Staubabscheidung und Materialrückführung. Ebenso ist die Luftvorwärmung und Zuführwege der Primär- bzw. Sekundärluft in den Reaktor dargestellt.

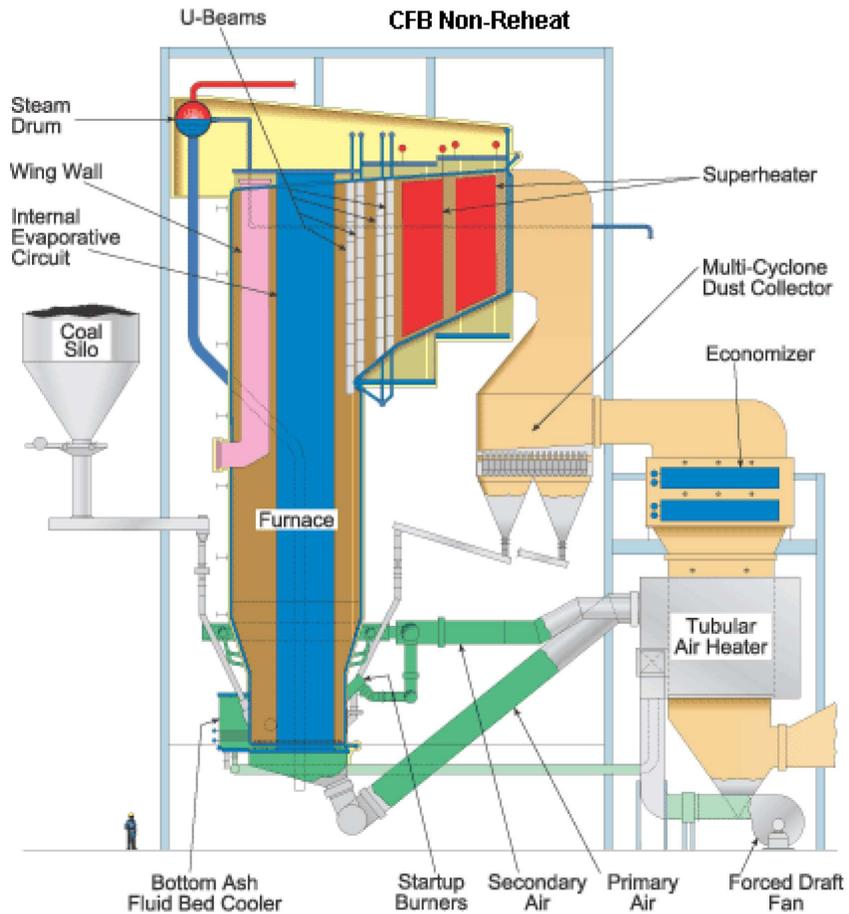


Abbildung 3.4-4: Zirkulierende Wirbelschichtfeuerung (Babcock & Wilcox) [50]

3.5 Wirbelschichttechnik

Das Grundprinzip von Wirbelschichtreaktoren besteht aus dem Durchströmen einer Partikelschicht (Schüttung), welche bei Erreichen einer bestimmten Strömungsgeschwindigkeit in einen schwebende- bzw. flüssigkeitsähnlichen Zustand versetzt wird. Die Wirbelschicht (WS) wurde um 1920 entwickelt und großtechnisch erstmals für Kohlevergasung eingesetzt [14]. Dabei können als Fluidisierungsmedien Gase oder Flüssigkeiten zum Einsatz kommen. Die in dieser Arbeit behandelte Form der Fluidisierung beschränkt sich ausschließlich auf jene mit Gasen.

Das breite Anwendungsfeld der WS umfasst unter anderem nachfolgende Bereiche [15]:

- Verbrennung (z.B. Müllverbrennungsanlagen)
- Vergasung und Verkohlung (z.B. Produktgaserzeugung)
- Cracking (z.B. Crackanlagen mit Katalysatoren)
- Kalzinierung
- Synthese Reaktionen (z.B. Fischer-Tropsch Synthese)

Die wesentlichen Vorteile umfassen unter anderem [15]:

- Gleichmäßige Temperatur- und Reaktionsbedingungen durch intensive (ideale) Durchmischung im gesamten Reaktorraum (keine lokalen Überhitzungen/Hot-Spots)
- Erhöhter Stoff- und Wärmeübergang im Vergleich zu anderen Reaktoren
- Hohe Brennstoffflexibilität (Brennstoffe von stückig bis sehr fein, fest bis gasförmig, hochwertig bis Abfallprodukte können eingesetzt werden)
- Verbrennungstemperaturen bei WS-Feuerung meist auf 800-900°C limitiert (niedrige NO_x-Emissionen)
- Große Austauschfläche zwischen Partikeln und Gas (gut bei katalytischen Reaktionen)
- Gute Handhabung des Feststoffes aufgrund des fluiddynamischen Verhaltens
- Möglichkeit der Beimischung von Zusatzstoffen zur Schadstoffbindung (Kalkstein oder Dolomit zur Schwefel- und Chlorbindung)

Dem gegenüber stehen einige der angeführten Nachteile [15]:

- Erhöhter Energieaufwand zur Erzeugung der Wirbelschicht
- Verstärkt Abrieb- bzw. Erosionseffekte bei Partikel und/oder Einbauten und damit verbundenem erhöhten Feststoffaustrag (Filter u. eventuelle Gasaufbereitung nötig)
- Aschebedingte Schwierigkeiten (Agglomeration, Anbackungen)

3.5.1 Verfahrenstechnische Kenngrößen der Wirbelschichttechnik

Als Grundlage der nachfolgenden Begriffsbestimmungen sowie angegebenen Zusammenhänge wurde [15] herangezogen.

Siebdurchmesser d_p : Der Siebdurchmesser ist definiert durch die Seitenlänge des Quadrates (Maschenweite eines Siebes, d_i), durch welches das Partikel gerade noch durchgeht.

$$d_p = \frac{d_i + d_{i+1}}{2} \quad (3.5.1)$$

Sauter-Durchmesser d_{SV} : Durchmesser einer Kugel mit gleichem Oberflächen zu Volumen-Verhältnis wie das Einzelpartikel (P=Partikel, K=Kugel).

$$\frac{O_P}{V_P} = \frac{O_K}{V_K} = \frac{d_{SV}^2 \cdot \pi}{\frac{d_{SV}^3 \cdot \pi}{6}}; \quad d_{SV} = \frac{6 \cdot V_P}{O_P} \quad (3.5.2)$$

Formfaktor Φ : Um den Einfluss der Partikelform zu berücksichtigen, wird der Formfaktor des Bettmaterialpartikels wie folgt mit dem Siebdurchmesser verknüpft, um näherungsweise den Sauterdurchmesser berechnen zu können. Dabei liegt der Formfaktor im Bereich von $\Phi = 0,6 - 1$, wobei $\Phi = 1$ einer Kugel entspricht.

$$\Phi = \frac{\text{Oberfläche der volumengleich Kugel}}{\text{Oberfläche des Partikels}} \quad (3.5.3)$$

Annähernd Kugelform: $d_{SV} \approx \Phi \cdot d_p \quad (3.5.4)$

Eine Dimension größer, aber nicht mehr als 2:1: $d_{SV} \approx d_p \quad (3.5.5)$

Eine Dimension kleiner, aber nicht weniger als 1:2: $d_{SV} \approx \Phi^2 \cdot d_p \quad (3.5.6)$

Porosität ε : Das auch als Lückengrad bekannte ε definiert das Verhältnis von Lückenvolumen zu Gesamtvolumen (V_b). Anstatt der Volumina können nach entsprechender Umformung auch die Dichten verwendet werden, da die Masse konstant ist. Dabei ergibt sich der Zusammenhang von Porosität ε , Partikeldichte ρ_p und Schüttdichte ρ_b .

$$\varepsilon = \frac{\text{Lückenvolumen}}{\text{Gesamtvolumen}} = \frac{V_b - V_{PS}}{V_b} = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \quad (3.5.7)$$

Leerrohrgeschwindigkeit U : Bezeichnet die Strömungsgeschwindigkeit im leeren Rohr und somit das Verhältnis aus Volumenstrom zu Querschnittsfläche der Wirbelschicht ($=\dot{Q}/A$).

3.5.2 Fluidisierung und Wirbelschichtzustände

Eine Wirbelschicht ist dadurch charakterisiert, dass eine Schüttung aus körnigem Gut (Bettmaterial) durch einen Fluidstrom in Bewegung versetzt wird und sich dabei eine flüssigkeitsähnliche Schicht einstellt. Je nach Geschwindigkeit des Fluidstroms, können sich unterschiedliche Formen der Wirbelschicht ausprägen. Dabei ist es wesentlich, dass zumindest die Lockerungsgeschwindigkeit (U_L) der Schüttung erreicht wird, um einen Schwebeszustand bzw. Ausdehnung des Bettmaterials zu erzielen. Unterhalb dieses Lockerungspunktes spricht man von einem Festbett. [16]

Druckverlust Δp : Der Druckverlust im Gebiet der Wirbelschicht ist, im Gegensatz zum Druckverlust im Festbettbereich, unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit und bleibt innerhalb des Existenzbereiches von WS unverändert. Das Kräftegleichgewicht aus Widerstandskraft der Fluidströmung und der Gewichtskraft (F_G) der Schüttung, vermindert um die Auftriebskraft (F_A), entspricht nach entsprechender Umstellung, dem Druckverlust (Δp_{WS}) der Wirbelschicht und kann wie folgt angeschrieben werden [16]:

$$\Delta p_{WS} \cdot A = F_G - F_A \quad \rightarrow \quad \Delta p_{WS} = (1 - \varepsilon) \cdot (\rho_p - \rho_g) \cdot g \cdot H \quad (3.5.8)$$

Aus Gleichung 3.4.8 geht anschaulich hervor, dass bei Ausdehnung des Bettes (H steigt) durch Erhöhung des Volumenstromes bzw. Leerrohrgeschwindigkeit, ebenso die Porosität ε steigt. Demzufolge bleibt der Druckverlust vom Lockerungs- bis zum Austragungspunkt konstant.

Für den Druckabfall im Bereich des Festbettes, können mit der Modellgleichung nach Carman-Kozeny ($Re < 1$) und Gleichung nach Ergun ($Re > 1$), gute Näherungen erzielt werden. [15]

Abbildung 3.5-1 zeigt den Druckverlustverlauf beim Übergang vom Festbett in den Wirbelschichtbereich. Im Bereich des Festbettes, also unterhalb der Lockerungsgeschwindigkeit, steigt der Druckverlust mit Erhöhung des Volumenstromes. Über dem Lockerungspunkt stellt sich ein konstanter Verlauf der Druckverlustkurve ein. Dieser Übergang ist bei besonders enger Korngrößenverteilung gut ausgeprägt. Entspricht die Leerrohrgeschwindigkeit jener der Schwebegeschwindigkeit (U_S) des Einzelpartikels, kommt es zum Austrag des Bettmaterials aus der Wirbelschicht und die Anlage würde sich entleeren. Bei dem Effekt der Entleerung, nimmt das Bettmaterial ab und ebenso sinkt der Druckverlust. Werden die Partikel jedoch wieder zurückgeführt so nimmt bei Erhöhung des Volumenstroms auch der Druckverlust zu.

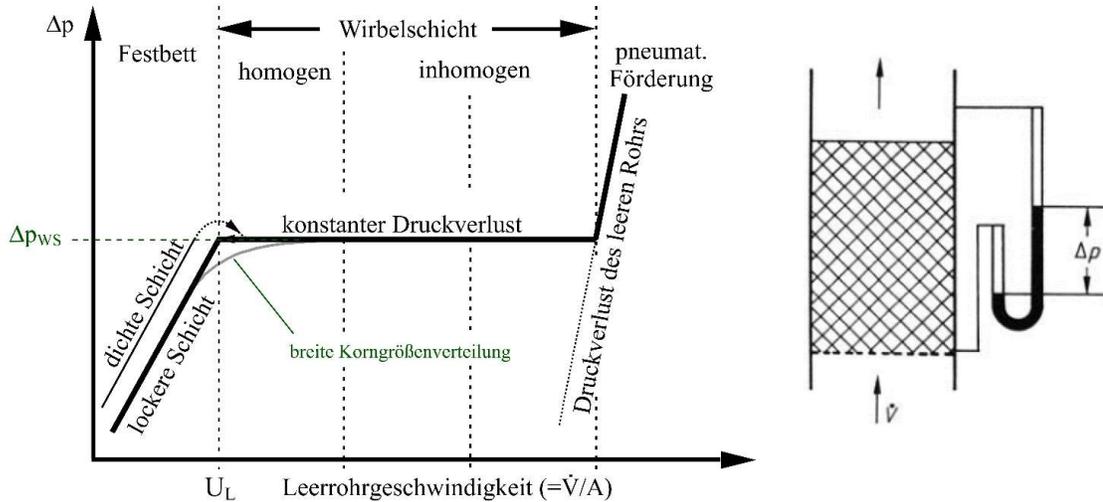


Abbildung 3.5-1: Druckverlustverlauf Wirbelschichttechnik (modifiziert) [48] [49]

Lockerungsgeschwindigkeit U_L : Der Druck im Festbett muss nach Abbildung 3.5-1, am Lockerungspunkt, jenem in der Wirbelschicht entsprechen. Mit dieser Festlegung kann nun die Lockerungsgeschwindigkeit durch Gleichsetzen der fundamentalen Fluidisierungsbedingung (Glg. 3.4.8) und der Gleichung nach Ergun [17] bestimmt werden. In der Praxis werden oftmals die Werte für ε_L aus empirischen Bestimmungen herangezogen und die Formel entsprechend nach U_L umgeformt [15].

$$U_L = \frac{\mu_g}{\rho_g \cdot d_{sv}} \cdot (\sqrt{33,7^2 + 0,0408 \cdot Ar} - 33,7) \quad (3.5.9)$$

Bei den in Glg. 3.4.9 eingesetzten Zahlenwerten handelt es sich um empirisch ermittelte Werte und können je nach Publikation variieren, wobei in dieser Arbeit die Werte nach Wen und Yu [18] verwendet wurden. Die darin vorkommende Archimedes-Zahl (Ar) kann dabei als das Verhältnis von Auftriebs- zu Reibungskraft gesehen werden und ergibt sich zu:

$$Ar = \frac{\rho_g \cdot d_{sv}^3 \cdot (\rho_p - \rho_g) \cdot g}{\mu_g^2} \quad (3.5.10)$$

Hier ist anzumerken, dass die Ar -Zahl nicht von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig ist und nur Stoffgrößen des Fluids und Bettmaterials enthält sowie die Erdbeschleunigung.

Schwebegeschwindigkeit U_S : Das Wirbelschichtgebiet wird nach oben hin durch die Schwebegeschwindigkeit (U_S) begrenzt und ist jene Geschwindigkeit, bei der das Einzelpartikel ausgetragen wird. Durch das Ansetzen eines Kräftegleichgewichtes am idealen kugelförmigen Einzelpartikel aus $F_G - F_A - F_W = F_B$, kann bei Nullsetzen der Beschleunigungskraft (F_B), da

die theoretische Endgeschwindigkeit erreicht ist, die Schwebegeschwindigkeit folgendermaßen angeschrieben werden [15]:

$$U_S = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{(\rho_p - \rho_g) \cdot d_K \cdot g}{\rho_g \cdot C_W}} \quad (3.5.11)$$

F_W ist dabei die Widerstandskraft.

Abhängig von den vorherrschenden Strömungsbedingungen, muss der Widerstandsbeiwert C_W entsprechend ermittelt werden [15]:

Laminarer Bereich ($Re < 0,2$) – Stokes’scher Bereich: $C_W = \frac{24}{Re}$ (3.5.12)

Übergangsbereich ($0,2 < Re < 1000$) – zumeist in WS: $C_W = \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt{Re}} + 0,4$ (3.5.13)

Turbulenter Bereich ($Re > 1000$) – Newton’scher Bereich: $C_W = 0,43$ (3.5.14)

Die dimensionslose Kennzahl nach Reynolds (Re) stellt dabei das Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeitskräften dar und wird wie folgt gebildet:

$$Re = \frac{\rho_g \cdot U \cdot d_K}{\mu} \quad (3.5.15)$$

Wirbelschichtgebiete: In Bezug auf Abbildung 3.4-2 zeigt sich bei Geschwindigkeiten unterhalb von U_L keine Bettexpansion und stellt den Bereich des Festbettes dar. Ab dem Lockerungspunkt kommt es zu einer Fluidisierung der Schüttung und eine unterschiedlich starke Expansion, bis zum Austragungspunkt, stellt sich ein. Darüber hinaus beginnt die pneumatische Förderung und Austrag bzw. Transport der Partikel.

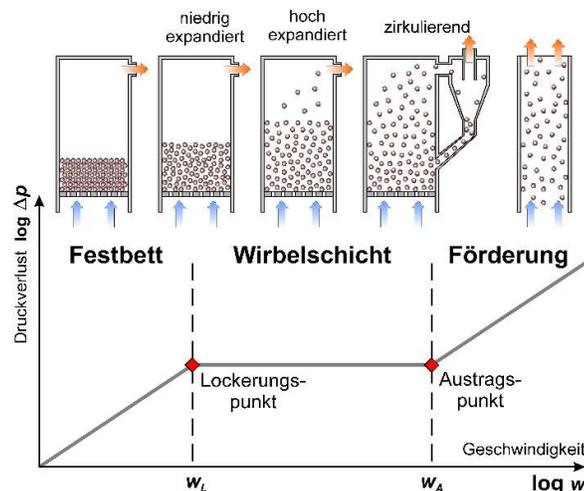


Abbildung 3.5-2: Übergangsdiagramm – Wirbelschichtzustände [50]

Wie in Abbildung 3.5-3 (links) dargestellt, kommt es bei näherer Betrachtung beim Überschreiten der Lockerungsgeschwindigkeit (U_L) zu einem Schwebезustand der Partikel. Kommt als Fluidisierungsmedium eine Flüssigkeit zur Anwendung, so expandiert das Festbett sehr gleichmäßig (Homogene WS). Hingegen kommt es bei Aufwirbelung durch Gase sehr rasch zur Blasenbildung (Inhomogene WS), welche mit steigender Höhe an Größe zunehmen und teils zusammenwachsen. Bei WS mit geringem Durchmesser (z.B. Laboranlagen) können die Blasen u.U. bis zur Größe des Querschnitts anwachsen. Das Verhalten der WS ist in diesem Fall als pulsierend zu bezeichnen und hat Druckschwankungen zur Folge. Bei weiterer Annäherung an die Austragungsgeschwindigkeit kommt es zur Strahlenbildung bzw. Ausbildung von Feststoffballen und damit verbundenem, zunehmenden, Materialaustrag. Die scharfe Trennlinie von Bettoberkante zu Gasraum verschwindet. Dieser Zustand wird als turbulente WS bezeichnet. Bei weiterer Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit, gelangt man in den Bereich der schnellen oder transportierenden WS. Dabei wird das ausgetragene Bettmaterial durch apparative Einrichtungen wie Zyklone wieder rückgeführt, um einen stationären Betrieb aufrecht zu erhalten. Über die Gesamthöhe des Steigrohres ergibt sich dabei eine partikeldichte Zone im unteren Bereich und eine partikelarme obere Zone. Kennzeichnend für eine schnelle WS ist der Effekt, dass Partikelcluster seitlich an den Wänden hinunter wandern, hingegen in der Mitte die Partikel entgegengesetzt nach oben transportiert und ausgetragen werden. [15] [19]

Abbildung 3.5-3 (Mitte) verdeutlicht die Feststoffverteilung ($f = 1 - \epsilon$) über die Höhe der unterschiedlichen WS-Regime. Die blasenbildende WS weist hier noch eine klare Trennlinie von Bettmaterial zum darüberliegenden Gasraum (Freeboard) auf. Bei der turbulenten WS sinkt die Partikeldichte mit zunehmender Höhe bis zur *Transport disengaging height* (TDH), welche die Grenze zum konstanten Feststoffaustrag, wie bei der schnellen WS, kennzeichnet.

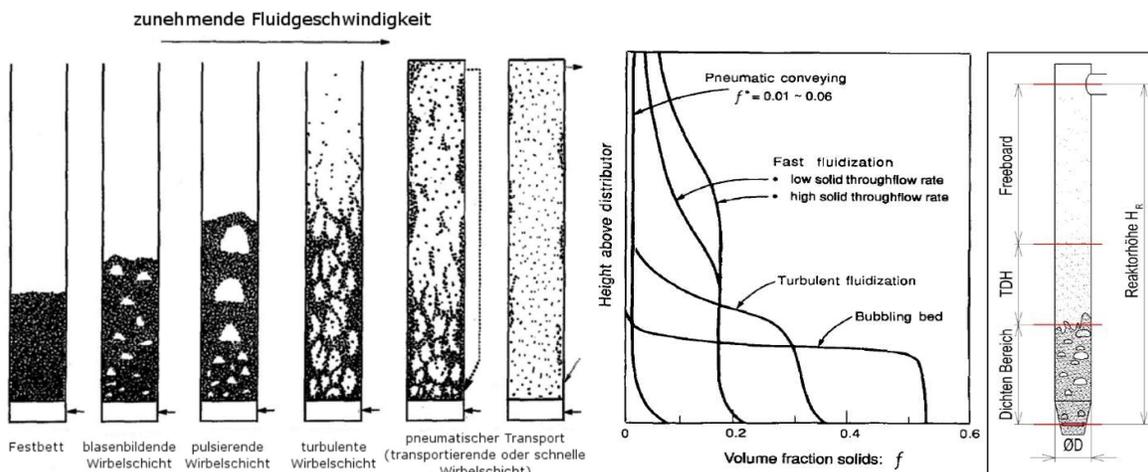


Abbildung 3.5-3: Wirbelschichtregime und Feststoffverteilung [12] [50]

3.5.3 Zustandsdiagramme

Die Anwendung von Zustandsdiagramme im Bereich der Wirbelschichttechnik hat den Vorteil, dass trotz der Kenntnis von wenigen Größen, eine erste Abschätzung der erforderlichen Geschwindigkeiten zum Erreichen eines vorher definierten Wirbelschichtregimes, angestellt werden kann. Dazu werden die allgemein bekannten dimensionslosen Kennzahlen herangezogen und entsprechend in den Diagrammen eingetragen. [15]

Zustandsdiagramm nach Reh [20]: Im Reh-Diagramm können, neben der schon vorgestellten Ar- und Re-Zahl, zusätzlich noch die Ω -Zahl sowie Froudezahl (Fr-Zahl) eingetragen werden. Die beiden gekrümmten, farbig, eingetragenen Linien (grün bzw. lila) stellen die Grenzkurven der Existenzbereiche von Festbett, Wirbelschicht und Feststoffaustrag dar. Dabei ist für Gas/Feststoff-Systeme zu erkennen, dass hin zu kleineren Ar-Zahlen, also kleineren Partikeldurchmessern, die Breite des Übergangsbereichs von WS zu Partikelaustrag zunimmt (gelber Bereich, Abbildung 3.5-4). Dieser Bereich zwischen der obersten gekrümmten Linie (grün), bis hin zur horizontalen Austragungsline ($\epsilon \rightarrow 1$) ist gekennzeichnet durch eine starke Expansion der WS (schnelle WS) und den damit verbundenen Partikelaustrag.

Möchte man nun den Arbeitsbereich bei bekanntem Partikeldurchmesser auftragen, so geschieht dies mit der Berechnung der Ar-Zahl. Diese zeichnet sich dadurch aus, dass keine Geschwindigkeit enthalten ist und somit einfach ermittelt werden kann. Bei Veränderung der Leerrohrgeschwindigkeit, bewegt man sich entlang dieser eingetragenen Linie (Ar-Zahl ist konstant, rote Linie) zwischen den Grenzen der Lockerungskurve und Schwebelinie.

Bei bekannter oder festgelegter Leerrohrgeschwindigkeit, wird mit der Ω -Zahl gearbeitet und analog zur Ar-Zahl im Diagramm eingetragen (Ω -Zahl konstant, blaue Linie). Nun bewegt man sich entlang der Linie mit konstanter Ω -Zahl und kann die Partikeldurchmesser ermitteln, welche gerade noch ausgetragen werden bzw. nicht mehr fluidisiert werden können (z.B. Agglomerate).

Es sei darauf hingewiesen, dass es sich beim Arbeiten mit dem Reh-Diagramm, hinsichtlich der Geschwindigkeiten, um die im Allgemeinen nicht bekannten Relativgeschwindigkeiten zwischen Partikel und Fluid handelt. Dies ist jedoch kritisch zu betrachten, da diese in der WS stark variieren können (Ausbildung unterschiedlicher Zonen). In der Literatur finden sich dazu Gleichungen um dies zu berücksichtigen [21]. Zur Abschätzung der Geschwindigkeiten wurde in dieser Arbeit das Reh-Diagramm wie oben beschrieben verwendet und mit den Werten aus den empirischen Gleichungen in Kapitel 3.5.2 bzw. dem Grace-Diagramm [22] gegenübergestellt.

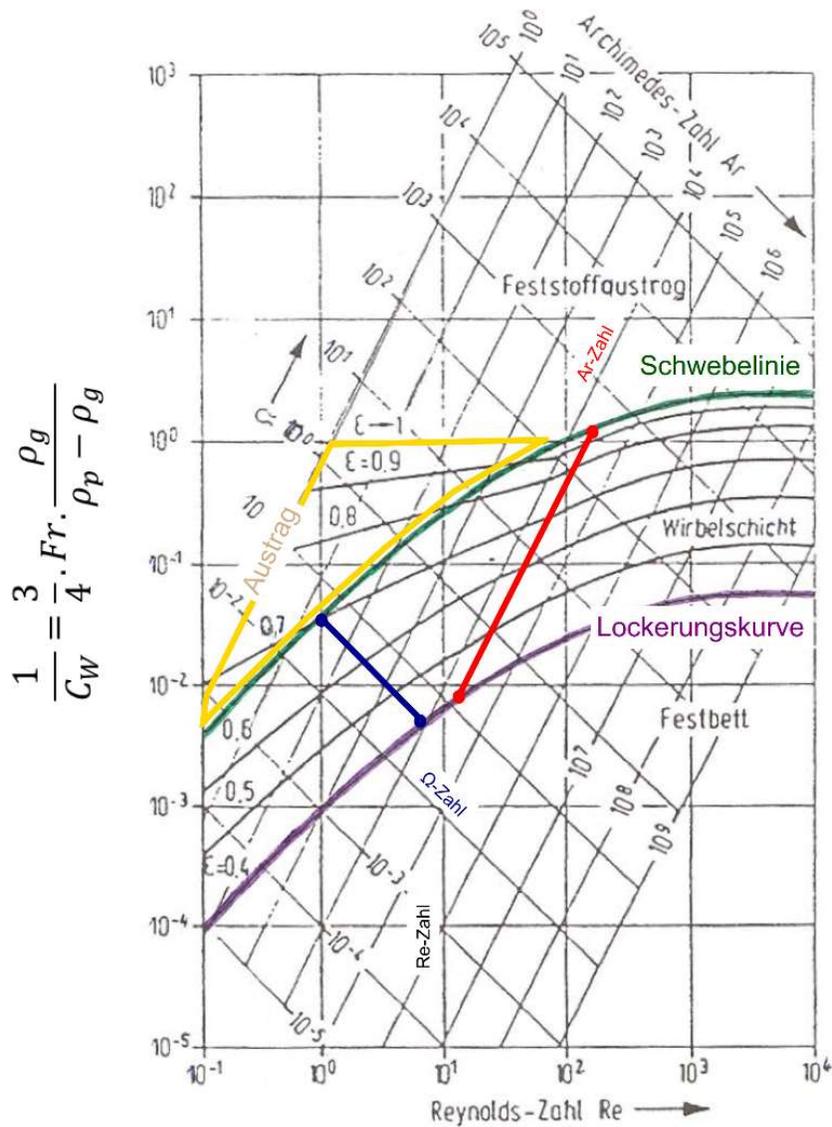


Abbildung 3.5-4: Zustandsdiagramm nach Reh [15]

Die Froudezahl stellt das Verhältnis aus Trägheits- zu Schwerkraft dar und ist wie folgt definiert:

$$Fr = \frac{U^2}{d_{sv} \cdot g} \quad (3.5.16)$$

Die dimensionslose Ω -Zahl ist folgendermaßen definiert:

$$\Omega = \frac{\rho_g^2 \cdot U^3}{(\rho_p - \rho_g) \cdot g \cdot \mu} \quad (3.5.17)$$

Zustandsdiagramm nach Grace [22]: Ein dem Reh-Diagramm ähnliches, jedoch weiterentwickeltes, Zustandsdiagramm stellt das Diagramm nach Grace dar. Die Achsen bilden dabei der dimensionslose Partikeldurchmesser (d_p^*) und die dimensionslose Fluidgeschwindigkeit (U^*). Ebenso sind die bekannten Existenzbereiche der blasenbildenden (bubbling), turbulenten (turbulent) sowie der zirkulierenden (fast) Wirbelschicht eingetragen. Die Grenzen zu den unterschiedlichen Bereichen werden durch Geschwindigkeitskurven ($U_{mf} = U_L, U_t = U_S, U_c, U_{se}$) dargestellt. Die Linie U_{mf} entspricht dem Lockerungspunkt und U_t der Endgeschwindigkeit. U_c kennzeichnet die Grenzlinie zwischen dem Gebiet des blasenbildenden und turbulenten Wirbelschichtregimes. U_{se} entspricht der Geschwindigkeit, ab der ein signifikanter Materialaustrag stattfindet. Des Weiteren zeigt das Diagramm, die häufig angewendete Schüttguteinteilung nach Geldart [23] in die Gruppen A bis D. Die Zusammenhänge der im Grace Diagramm verwendeten dimensionslosen Kennzahlen (U^*, d_p^*), zu den standardmäßigen Ähnlichkeitsgrößen (Ar-, Re-Zahl), können direkt den Diagrammachsen entnommen werden (vgl. Abbildung 3.5-5).

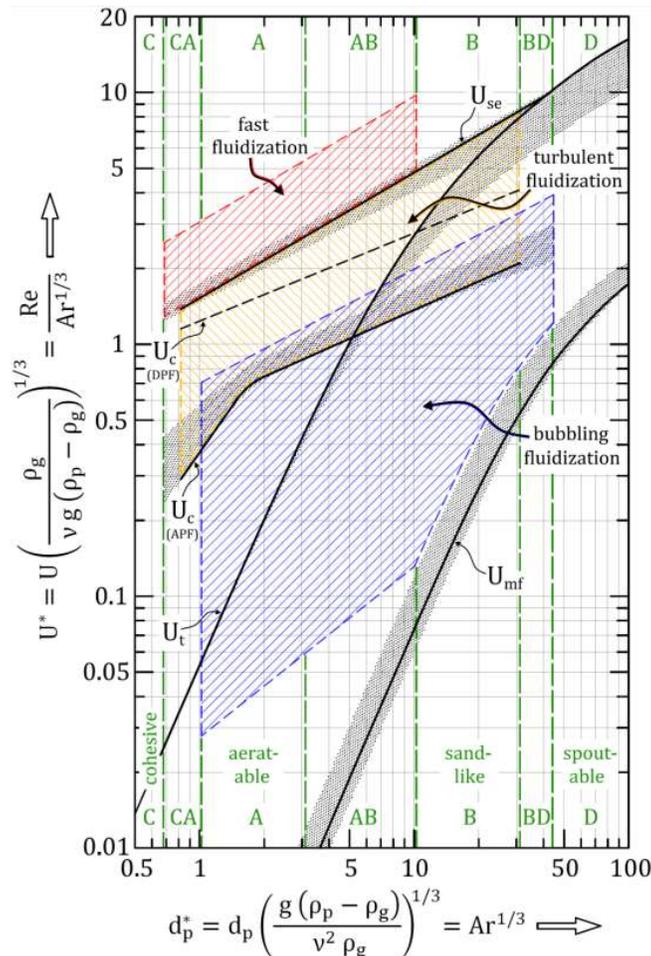


Abbildung 3.5-5: Zustandsdiagramm nach Grace (modifiziert Schmid) [51]

3.5.4 Bettmaterial

In diesem Kapitel wird eine mögliche Klassifizierung des Bettmaterials erläutert sowie auf Alternativen zum oftmals verwendeten Quarzsand als Bettmaterial eingegangen.

Klassifizierung nach Geldart [23]: Die Einteilung und Kenntnis der Schüttgutgruppe nach Geldart gibt Aufschluss über das Verhalten des Bettmaterials in Wirbelschichten. Die Einteilung erfolgt in vier Gruppen (C, A, B, D) nach deren Partikeldurchmesser (d_p) und Dichteunterschied ($\rho_p - \rho_g$) zwischen Partikel und Fluid.

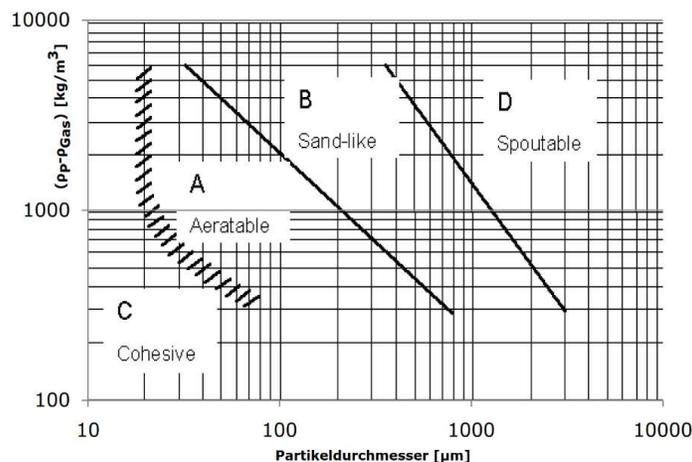


Abbildung 3.5-6: Schüttgutklassifizierung nach Geldart [50]

Cohesive (C): Partikel der Gruppe C sind sehr schwierig zu fluidisieren, aufgrund der großen Zwischenpartikelkräfte (kohäsiv). Gruppe der sehr kleinen und pulverartigen Schüttgüter, welche zur Kanalbildung neigen. Spielen in der Wirbelschichttechnik eine untergeordnete Rolle.

Aeratable (A): Diese Gruppe ist gekennzeichnet durch eine anfänglich homogene Expansion und Ausbildung von Blasen erst bei höheren Geschwindigkeiten. Anwendung findet diese Gruppe vor allem in turbulenten und schnellen WS (z.B. Crackanlagen mit Katalysatoren).

Sand-like (B): Diese Partikel sind charakterisiert durch Blasenbildung bereits nach dem Überschreiten des Lockerungspunktes. Diese Gruppe hat praktisch die größte Bedeutung und zeichnet sich durch eine gute Partikeldurchmischung aus. Die Zwischenpartikelkräfte können hier vernachlässigt werden.

Spoutable (D): Zu dieser Gruppe zählen Partikel mit sehr hoher Dichte und/oder Größe. Es bilden sich ebenso bereits nach Überschreitung der Lockerungsgeschwindigkeit erste Blasen aus, unterscheiden sich in deren Charakteristik (Sprudelschichten) jedoch deutlich von jener des Schüttguts der Gruppe B. Anwendung findet die Gruppe vor allem in der Lebensmittelindustrie.

Alternative Bettmaterialien: Neben dem Quarzsand als Bettmaterial, können eine Vielzahl alternativer Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaften eingesetzt werden. Probleme hinsichtlich Agglomerationsvorgängen in der Wirbelschicht (sh. Kapitel 3.6), wie diese in Verbindung mit Quarzsand als Bettmaterial auftreten, können teils reduziert oder auch gänzlich vermieden werden. Dabei gilt es, die für den Anwendungsfall ideale Kombination aus Bettmaterial und Biomasse zu finden. Aus diesem Grund gibt es Bestrebungen, Alternativen zu finden, welche kein problematisches Verhalten in Verbindung mit der Asche (Coating, Anbackung, Korrosion) zeigen. Zu beachten sind dabei die oftmals stark veränderten mechanischen Eigenschaften. Nebeneffekte wie Abrasion oder Kornbeständigkeit bringen, neben den möglichen Verbesserungen hinsichtlich dem Ascheverhalten, auch nachteilige Effekte mit sich. Zum Beispiel kann Kornbruch, zufolge geringer mechanischer Langzeitbeständigkeit (Zermahlung im Wirbelbett), einen signifikanten Anstieg an Materialaustrag zur Folge haben. Eine notwendige Nachdosierung an Bettmaterial wirft hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit (Austauschrate, Verfügbarkeit) neue negative Aspekte auf. Aussagekräftige Ergebnisse bezüglich des Verhaltens unter tatsächlichen Wirbelschichtbedingungen können im Grunde nur experimentell durchgeführte Versuchsreihen liefern. Beispielsweise ergaben Versuche mit Olivin einen Anstieg an KCl in der Flugasche und damit einer verstärkt feststellbaren Ablagerung im Abgaskanal. [24] Demgegenüber steht der Vorteil eines kaliumarmen Bettmaterials, welches hohe Einsatztemperaturen ermöglicht. Neben den hier vorrangig beschriebenen mechanischen Eigenschaften, weist beispielsweise Olivin auch katalytische Merkmale auf, welche in Bezug auf Produktgasoptimierung bei der Vergasung eine besonders interessante Alternative darstellt.

Eine Auflistung möglicher alternativer Bettmaterialien wird in Tabelle 3.5-1 gezeigt:

Tabelle 3.5-1: Alternative Bettmaterialien [24]

Gruppe	Bezeichnung	Chemische Formel
Silikate	- Olivin	- $(\text{Mg, Mn, Fe})_2[\text{SiO}_4]$
	- Kaolin	- $\text{Al}_4(\text{OH})_8[\text{Si}_4\text{O}_{10}]$
	- Feldspat	- $(\text{Ca, K, Na})(\text{Al, Si})_4\text{O}_8$
Carbonate	- Kalkstein	- CaCO_3
	- Dolomit	- $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
	- Magnesit	- MgCO_3
Sonstige	- Alumina	- Al, Si, Ti
	- Bauxit	- $\text{Al}(\text{OH})_3$
	- Schlacke aus Schmelzöfen	- Si, Ca, Mg, Al

3.5.5 Gasverteilerböden

Eine wesentliche Funktion haben die Gasverteilerböden in den Wirbelschichtanlagen. Zum einen müssen diese das Bettmaterial tragen können, zum anderen gilt es eine möglichst gleichmäßige Verteilung des Fluidgases zu gewährleisten, um so einen guten Wirbelzustand über den gesamten Querschnitt der WS zu realisieren. Dabei muss zwischen kleinen Laborapparaturen und kommerziell genutzten Anlagen der Industrie unterschieden werden. [15]

Abbildung 3.5-7 zeigt die für den Laborgebrauch meist verwendeten Gasfritten (poröse Platten, Sinterplatten) bzw. Lochplatten und in Industrieanwendungen häufig anzutreffenden Düsen- bzw. Glockenböden. Lochböden und Begaserringe finden ebenfalls vermehrt Anwendung in der Industrie. Dem Vorteil von nahezu idealer Gasverteilung der Fritten, steht nachteilig die hohe Neigung zur Verstopfung sowie der geringen thermischen als auch mechanischen Festigkeit, gegenüber.

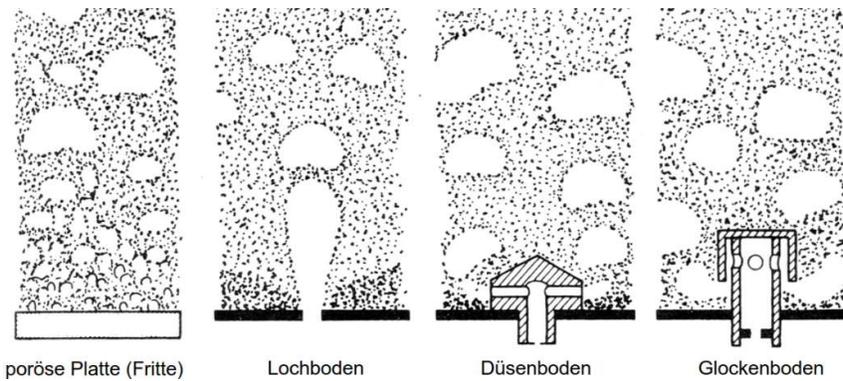


Abbildung 3.5-7: Ausführungsformen von Gasverteilerböden (modifiziert) [52]

Die für die Auslegung von Verteilerböden wesentliche Größe, ist der erforderliche Druckabfall des Bodens. Ein Mindestmaß davon ist notwendig, um eine gleichmäßige Fluidisierung zu erreichen. Ein zu großer Druckabfall ist aus rein wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu vermeiden. In der Praxis hat sich die Angabe des Druckabfallverhältnisses von Verteilerboden (Distributor) und Wirbelschicht (Bed) als nützlich erwiesen.

Basierend auf Glg. 3.4.18 kann das Druckverlustverhältnis in Diagrammform dargestellt werden (Abbildung 3.5-8). Dabei ist ersichtlich, dass sich bei WS mit großen Durchmessern (D), ein Praxiswert von rund 21% bewährt hat. Hingegen kommen WS mit kleinen Querschnittsflächen, im Verhältnis zu deren Höhe (H), mit deutlich niedrigeren Druckverlustverhältnissen, von teils schon 5-10 %, aus.

$$\frac{\Delta P_D}{\Delta P_B} = 0,01 + 0,2 \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{D}{2 \cdot H}\right) \right] \quad (3.5.18)$$

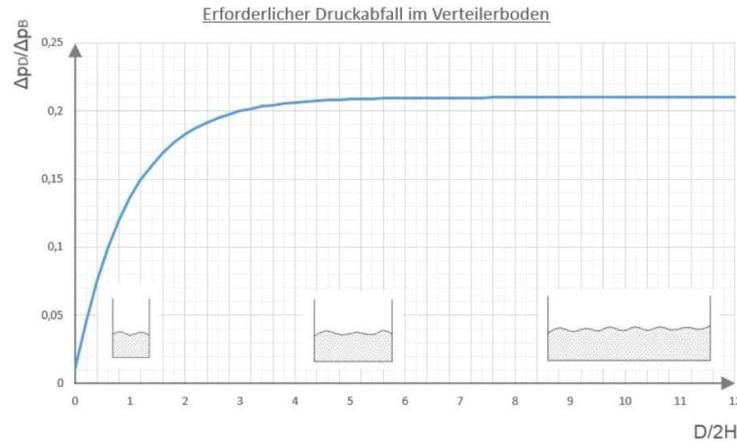


Abbildung 3.5-8: Mindestdruckabfall des Verteilerbodens [15]

Der Druckabfall des Verteilerbodens kann nach Glg. 3.4.19 ermittelt werden. Nach Festlegung der Ausführungsform, kann nun bei Kenntnis des notwendigen Druckverlustes, die Anzahl an Löcher/Düsen und Lochdurchmesser aufeinander abgestimmt werden, um diesen zu erreichen.

$$\Delta P_D = \xi_0 \cdot \frac{\rho_g \cdot U_0^2}{2} \quad (3.5.19)$$

Dabei bedeuten U_0 die vorherrschende Lochgeschwindigkeit am Verteilerboden und ξ der Widerstandskoeffizient (VDI-Wärmeatlas). Die Gültigkeit von Glg. 3.4.19 für Lochböden ist, unter anderem, mit der Annahme von $U_{Windbox} \ll U_0$ verknüpft.

Weiters kann für Lochböden folgende Zusammensetzung des Druckverlustes beschrieben werden (vgl. Abbildung 3.5-9):

Strahlkontraktion: Ablösen von Stromfäden an der Eintrittskante mit folglich entstehender Verengung des Strömungsquerschnitts zu d'_0 .

Reibung: Reibungsdruckverlust durch Erweiterung des Stromfadens bei ausreichend starker Dicke (s) des Lochbodens bezogen auf den Lochdurchmesser (d_0).

Strahlvermischung: Vermischung der Lochströmungen bei sehr eng gesetzten Löchern, verstärkt durch Ausweitung der Strömungsfäden.

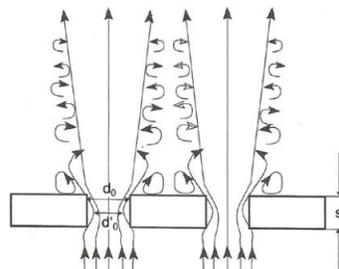


Abbildung 3.5-9: Druckverlust Lochboden [15]

Zur Ermittlung der konstruktiv interessanten Teilung (t) der Bohrungen (Lochabstand) und in weiterer Folge der Anzahl N an Löchern, ist das Freiflächenverhältnis (f_0) zu bestimmen. Dieses bildet sich aus dem Verhältnis der Summe aller Lochflächen (A_0) zur Gesamtquerschnittsfläche der Wirbelschicht bzw. des Verteilerbodens und verhält sich umgekehrt dem Verhältnis von Lochgeschwindigkeit (U_0) zu Geschwindigkeit in der Windbox ($U_{Windbox}$) (=Leerrohrgeschwindigkeit). Unter entsprechender Berücksichtigung des Druckverlustes, wie in Glg. 3.4.19 angeschrieben, kann folgende Gleichung angegeben werden:

$$\frac{U_0}{U_{Windbox}} = \frac{A}{A_0} \rightarrow f_0 = \frac{U_{Windbox}}{U_0} = \frac{U_{Windbox}}{\sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_D}{\xi_0 \cdot \rho g}}} \quad (3.5.20)$$

Anzustrebende Werte für f_0 bei Lochböden bewegen sich im Bereich von 1 - 5 %. Die Lochanzahl bei angenommenen Lochdurchmesser (d_0) wird wie folgt berechnet werden:

$$N = \frac{4 \cdot f_0 \cdot A}{d_0^2 \cdot \pi} \quad (3.5.21)$$

Die Wahl von d_0 sollte sich im Bereich von $3 \cdot d_p < d_0 < 10 \cdot d_p$ bewegen. In der Praxis hat sich gezeigt, dass die Neigung zur Verstopfung stark zunimmt, wenn d_0 dem Partikeldurchmesser sehr ähnlich ist. Dennoch ermöglichen kleine Durchmesser eine gleichmäßigere Fluidisierung als bei einem zu groß gewählten Bohrungsdurchmesser.

Die Teilung lässt sich nun nach Glg. 3.4.22 bei Festlegung von Dreiecks- bzw. Quadratteilung, berechnen. Generell ist eine Dreieckteilung aufgrund der gleichmäßigeren Anordnung zu bevorzugen.

Dreieck- bzw. Quadratteilung: $\frac{t}{d_0} = \left(\frac{\pi}{2 \cdot f_0 \cdot \sqrt{3}} \right)^{0.5}$ bzw. $\frac{t}{d_0} = \left(\frac{\pi}{4 \cdot f_0} \right)^{0.5} \quad (3.5.22)$

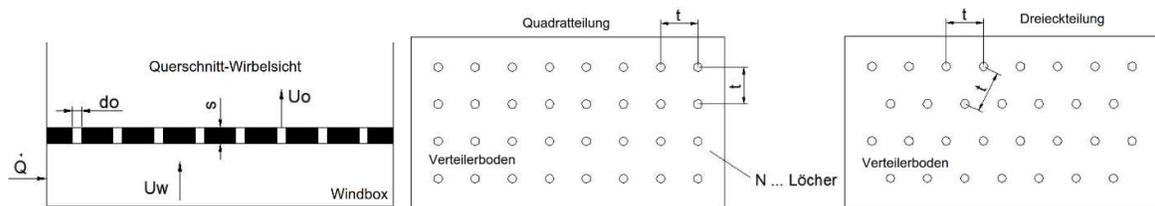


Abbildung 3.5-10: Teilungsvarianten Lochboden (modifiziert) [15]

Auf die Berechnung und Auslegung von Düsen- bzw. Glockenböden wird in dieser Arbeit nicht im Detail eingegangen.

3.6 Asche in Wirbelschichtanlagen

3.6.1 Bestandteile und Bildungsprozess

Die Hauptbestandteile der Asche wurden in Kapitel 3.1.6 genannt. Vertiefend dazu gibt es entsprechende Normen, in denen die Bestimmung der Haupt- als auch Spurenelemente, sowie deren Unterteilung ausführlich beschrieben wird [25] [26]. Dabei ist festzustellen, dass halmgutartige Biomasse einen hohen Anteil an Alkalien (K, Na) aufweist, hingegen bei holzgutartiger Biomasse der Anteil an Kalzium deutlich höher ist [24].

Der Aschebildungsprozess stellt einen komplexen Ablauf von parallel und hintereinander ablaufenden Umwandlungsprozessen dar, welche sich ebenso hinsichtlich der Temperatur stark überlappen können. Beginnend mit der Zersetzung der organischen Materie bei rund 200°-850°C, finden anschließend Reaktionen mit vorhandener anorganischer Materie, wie z.B. dem Bettmaterial, aber auch den Zersetzungsprodukten (Cl, K, S, etc.) untereinander, statt. Im Bereich von rund 700°C können oftmals die ersten Agglomerationen, aufgrund geschmolzener Aschepartikel bzw. mineralischen Phasen, beobachtet werden. [27]

3.6.2 Schmelzverhalten und deren Bestimmungsmethoden

Abhängig von der Aschezusammensetzung der jeweiligen Biomasse verhält sich deren Schmelzverhalten unterschiedlich und ist ein brennstoffspezifisches Merkmal. Die standardmäßige Bestimmung des Erweichungsverhaltens wird nach DIN 51730 [28] für fossile Energieträger durchgeführt. Dabei erfolgt die Erzeugung der Asche nach DIN 51719 [29]. Für Aschen aus fester Biomasse wurde die Vor-Norm CEN/TS 15370-1 [31] publiziert und sieht die Herstellung der Asche nach EN 14775 [31] vor.

Den Normen gemeinsam ist die Beobachtung der geometrischen Veränderung der Ascheprobe. Dabei wird die, in genormte Form (z.B. Zylinder) gebrachte, Probe unter konstanter Aufheizrate im Erhitzungsmikroskop erwärmt. Die Verformung des Probekörpers wird digital aufgezeichnet und die daraus resultierenden charakteristischen Temperaturen bestimmt. Im Wesentlichen unterscheiden sich die beiden Normen durch die Herstellungstemperatur der Aschen (Fossilbrennstoffe: 815°C; Biomasse: 550°C). Durch die Anpassung der Herstellungstemperatur

sowie dem Aufheizprofil wird auf die Unterschiede im thermo-chemischen Umwandlungsprozess Rücksicht genommen. [32]

Die aus dem Schmelzverhalten definierten Temperaturen sind folgende [30]:

- **Sintertemperatur (ST):** Beginn Schrumpfung des Probekörpers
- **Erweichungstemperatur (DT):** Erste Anzeichen von Abrundungen und Erweichung
- **Halbkugeltemperatur (HT):** Probe hat annähernd Halbkugelform
- **Fließtemperatur (FT):** Asche zerfließt und breitet sich schichtartig am Probenträger aus

Die Methodik des Ascheschmelzversuches im Bereich der Wirbelschichttechnik hat, in Hinblick auf die tatsächlichen Verhältnisse innerhalb der Wirbelschicht, nur begrenzte Aussagekraft, da der Einfluss des verwendeten Bettmaterials sowie Fraktionierung der Asche, nicht berücksichtigt wird. Es hat sich gezeigt, dass die Auswertung nach Norm oftmals zu hohe Werte für den Erweichungspunkt liefert. Eine Erprobung der Biomasse in einer Labor-Versuchsapparatur, wie im Zuge dieser Arbeit aufgebaut, kann hier deutlich realitätsnähere Aussagen liefern. [24]

Vorhersagen auf Basis der Aschezusammensetzung, bilden eine weitere Möglichkeit, das Schmelzverhalten von Biomassen abschätzen und einordnen zu können. Dabei stellt die Verwendung eines Dreiecksdiagrammes, welches dadurch gekennzeichnet ist, die Aschebestandteile anteilmäßig im System der Hauptkomponenten $\text{SiO}_2\text{-CaO-K}_2\text{O}$ grafisch einzutragen, eine übersichtliche Methode dar. Abbildung 3.6-1 zeigt, dass Biomassen mit erhöhtem Kaliumgehalt im Bereich niedriger DT liegen (schraffiertes Gebiet). Hingegen findet sich holzgutartige Biomasse vorwiegend im Bereich mit hohem Kalzium- und Siliziumgehalt (schwarzes Gebiet). [33]

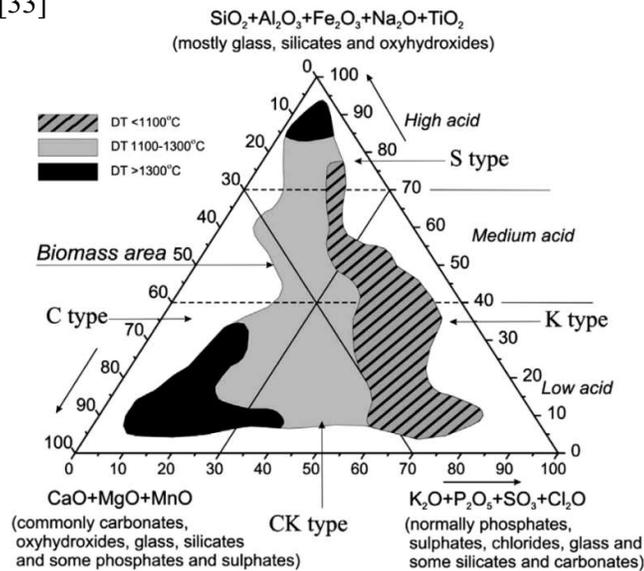


Abbildung 3.6-1: Dreiecksdiagramm - $\text{SiO}_2\text{-CaO-K}_2\text{O}$ System [33]

Dies deckt sich grundsätzlich mit der Feststellung nach [32], wonach Holz und Rinde im unkritischen Bereich ($DT > 1300^{\circ}\text{C}$) und Halmgüter vorwiegend im Bereich von $DT < 1200^{\circ}\text{C}$ und darunter, liegen.

In der Fachliteratur finden sich auch Methoden, die Erweichungstemperatur von Biomassebrennstoffen auf Basis von empirischen Gleichungen zu ermitteln (vgl. [34]). Eine andere Herangehensweise stellt die Verwendung von Indizes dar. Dabei stellen die berechneten Indizes einen Vergleichswert zu einem empirisch ermittelten Grenzwert für störungsfreien Betrieb dar (vgl. [24]).

3.6.3 Einfluss der Aschekomponenten auf die Erweichungstemperatur

Eine Gegenüberstellung der Aschezusammensetzung und deren Erweichungstemperatur zeigt deutlich die Einflüsse der Elemente auf das Schmelzverhalten. Wie in Abbildung 3.6-2 dargestellt, üben Kalzium und Kalium den größten Einfluss auf die Ascheerweichung aus. Kalzium verschiebt den Erweichungspunkt mit erhöhtem Anteil zu höheren Temperaturen. Für Magnesium ist nach [33] keine eindeutige Tendenz zu entnehmen. Negativen Einfluss, im Sinne von Senkung der Erweichungstemperatur, haben Silizium und Kalium als auch Phosphor bei anteilmäßiger Zunahme in der Asche.

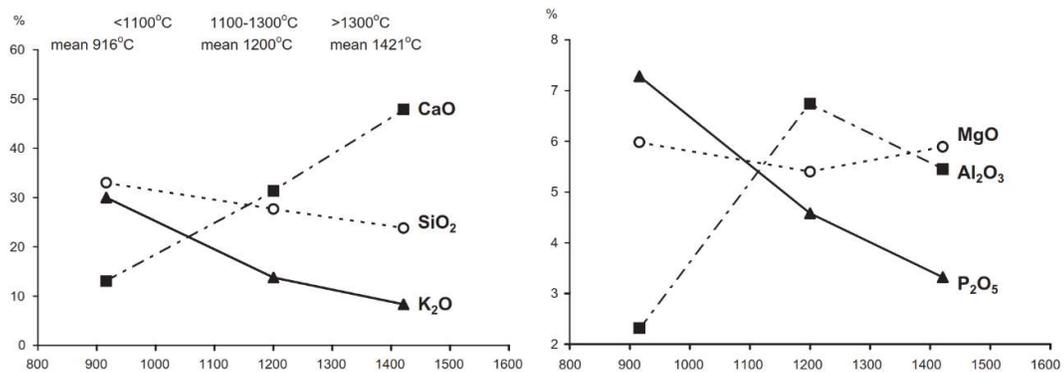


Abbildung 3.6-2: Einfluss der Aschekomponenten auf DT [33]

Das, bevorzugt im Bett gebundene, Kalium bildet mit dem oftmals verwendeten Quarzsand als Bettmaterial, niedrigschmelzende Eutektika. Dabei nimmt der Schmelzpunkt des, im Quarzsand enthaltene, SiO₂ in der Mischung mit Alkalimetallen ab ($< 800^{\circ}\text{C}$). Durch diese Substanzen kommt es zu Verklebungen und schlussendlich Agglomerationsproblemen. In letzter Konsequenz kann dieser Effekt zu lokalen Defluidisierungen führen und dem Entstehen von unterschiedlichen Temperaturzonen. Ein Zusammenbacken des gesamten Bettes kann die Folge sein. [24] [35]

3.6.4 Ascheproblematik in Wirbelschichtanlagen

Probleme in Zusammenhang mit der Asche sind eine der größten Herausforderungen im Bereich der Wirbelschichttechnik und kann zu unterschiedlichen Auswirkungen führen. Neben den im Folgenden näher betrachteten Schwierigkeiten der Agglomeration und Anbackung, stellen auch Korrosionserscheinungen (Chlorkorrosion) bekannte Problemfelder dar.

Fouling: Den Effekt der Anbackung feiner Aschefractionen an den inneren Flächen der Anlage nennt man Fouling. Dabei sind besonders der Rauchgaskanal und die Heizflächen betroffen, was zu Veränderung der Strömungsverhältnisse bzw. Isolationswirkung für den Wärmeübergang führt. Verstärkt in Bereichen nichtidealer Strömung (z.B. Toträume, Unterschreitung der Schwebegeschwindigkeit der Partikel) kommt es zu An- und Ablagerungen von Aschepartikel, welche der Gasströmung nicht mehr folgen können, vgl. Abbildung 3.6-3. [24]

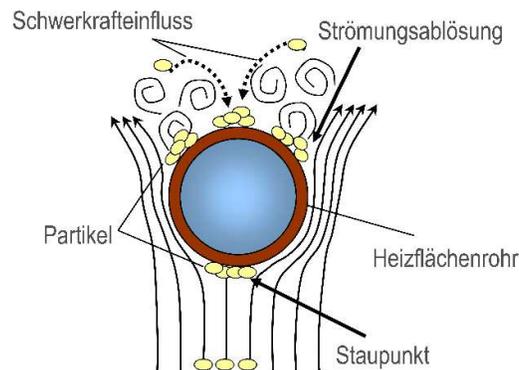


Abbildung 3.6-3: Ablagerungsmechanismus der Aschepartikel [24]

Agglomeration: Beim Problem der Agglomeration des Bettmaterials spricht man von Klumpenbildung durch Erhöhung der Adhäsionskräfte oder Brückenbildung zwischen den Partikeln des Bettmaterials, verursacht durch Aufschmelzen von Ascheschichten bzw. -partikeln. Grundlegend können hier zwei Mechanismen unterschieden werden, wobei bei holzgutartiger Biomasse verstärkt der Effekt der Bildung von Ascheschichten (Coating) beobachtet werden kann, hingegen bei halmgutartiger Biomasse die schmelzinduzierte Agglomeration vorrangig auftritt. Abbildung 3.6-4 zeigt die beiden beschriebenen Effekte. [24]

Die Ausbildung von Ascheschichten kommt zum einen durch Aufprall von Ascheteilchen am Bettmaterial zustande und zum anderen, dem Anlagern teilgeschmolzener Asche. Ebenso gibt es den Effekt der Gas-Feststoff Reaktion. Bei der wahrscheinlicheren Variante der Anlagerung durch teilgeschmolzene Aschepartikeln, bildet sich eine poröse, der Brennstoffasche ähnlichen, Außenschicht und eine kompakte Innenschicht aus dem System $\text{CaO-SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$, welche durch Diffusionsvorgänge in Richtung des Partikelkerns wächst (vgl. Abbildung 3.6-4, rechts). [24]

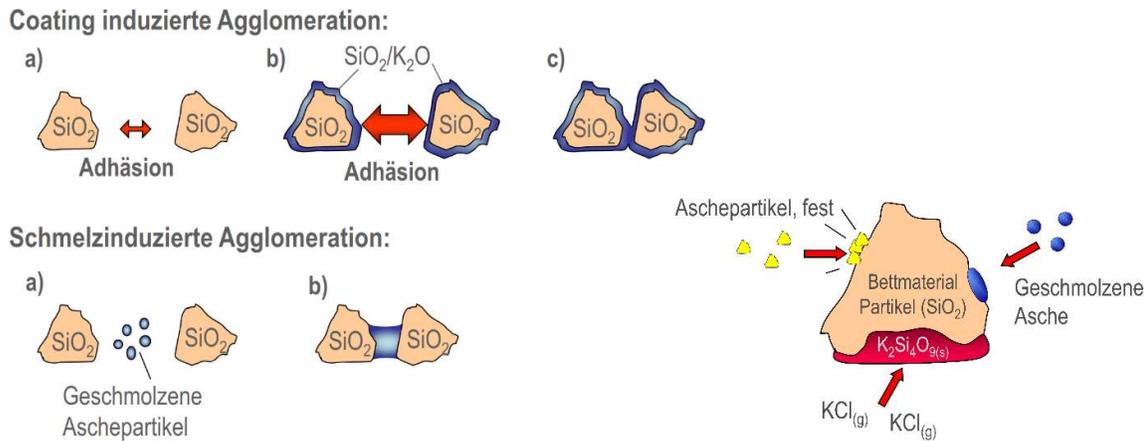


Abbildung 3.6-4: Mechanismen der Agglomeration [24]

Eine weitere Ursache kann das Oxidieren von, nach Abschaltung der Anlage, zurückgebliebenen, unverbrannten Brennstoffresten im Wirbelschichtbett sein. Dabei können lokal sehr hohe Temperaturen entstehen, welche durch unzureichende Wärmeabfuhr zu Agglomerationen im dann vorhandenen Festbett führen können. [35]

3.6.5 Gegenmaßnahmen

Möglichkeiten zur Reduktion oder Verhinderung von Agglomerationen des Bettmaterials stellen folgende, kurz zusammengefasste, Maßnahmen dar: [24] [35]

Prozessführung: Senkung der Brennraumtemperatur; Variation von Einstellparametern wie z.B. Volumenströme und Temperaturen.

Bettmaterial: Erhöhte Austauschrate des Bettmaterials; Verwendung von alternativem Bettmaterial (Olivin, Kalkstein, Alumina), welche keine niedrigschmelzende Eutektika mit der Asche bilden.

Additive: Zugabe von Brennstoffadditiven (Kaolin, CaCO_3), direkt bei der Brennstoffzufuhr oder -aufbereitung, ermöglicht die Verschiebung der Ascheerweichungstemperatur hin zu höheren Temperaturen. Effekt von erhöhtem Ascheanteil ist hier jedoch zu beachten.

Brennstoff: Mischung unterschiedlicher Brennstoffe; Anwendung von Waschverfahren (z.B. mehrere Stunden bei 80°C in destilliertem Wasser) vor Brennstoffzufuhr, bei dem Elemente wie K, Cl, P ausgewaschen werden und somit das Ascheverhalten positiv verändert wird.

Kapitel 4

Praktischer Teil

4.1 Anforderungen und Voraussetzungen

Wie auch schon eingangs erwähnt, wurden noch vor Beginn der ersten Überlegungen einige Voraussetzungen sowie Anforderungen und das eigentliche Anwendungsspektrum der aufzubauenden Versuchsanlage besprochen und definiert.

Brennstoff: Als Brennstoff soll Biomasse in Form von Pellets zum Einsatz kommen. Bevorzugt mit Standardabmessungen bezogen auf Pelletdurchmesser und -länge (Größenklasse D06 nach Norm [36] mit Durchmesser von $6 \text{ mm} \pm 1,0$ bzw. Länge von 3,15 - 40 mm).

Brennstoffzufuhr: Die Pelletzufuhr soll möglichst kontinuierlich erfolgen mit der Möglichkeit die Zufuhrgeschwindigkeit (regelfähig) entsprechend der Versuchsausführung anzupassen. Ebenso soll ein Vorratsbehälter, aus dem die Pellets gespeist werden, direkt bei der Gesamtkonstruktion integriert sein. Eine entsprechende Bunkerlösung soll Versuche über mehrere Stunden (bis zu 8-10 Std.) im Dauerbetrieb ermöglichen.

Stickstoff-Spülung: Das Vorsehen einer Stickstoffspülung zur Verhinderung eines eventuellen Rückbrandes über die Zufuhrstrecke bis in den Vorratsbunker, sowie gleichermaßen das Vermeiden von Bildung brennbarer Gasgemische, waren ebenso Anforderungen an das Zufuhrsystem.

Wirbelschichtreaktor: Die Apparatur soll einen Wirbelschicht-Durchmesser von rund 50mm aufweisen und entsprechend den ausgewählten Heizschalen angepasst werden.

Fluidisierung: Als Fluidisierungsgas soll für die Erstversuche Luft zur Anwendung kommen, welche, abhängig vom Aufstellungsort, aus Flaschen oder dem vorhandenen Druckluftsystem der TU Wien entnommen werden kann. Eine entsprechende Möglichkeit zur Durchflussmessung bzw. -regulierung (Schwebekörper-Durchflussmesser - Rotameter, Massendurchflussregler - MFC) ist ebenso, notwendigerweise, vorzusehen. Hinsichtlich der Wirbelschichtausprägung, soll der Betrieb als stationäre blasenbildende Wirbelschicht („bubbling bed“) realisiert werden.

Betriebstemperatur: Die Normal-Betriebstemperatur der Apparatur soll bei 850°C liegen, aber auch einen Betrieb darüber hinaus ermöglichen (bis 950°C). Entsprechende konstruktive und materialtechnische Anforderungen sind hier im Besonderen zu beachten und zu prüfen.

Bettmaterial: Als Bettmaterial soll Quarzsand im Partikelgrößenbereich von 150µm – 700µm zum Einsatz kommen. Die tatsächlich bei den Erstversuchen zur Anwendung kommende Größenfraktionen muss folglich ausgesiebt werden.

Anströmboden: Als Anströmboden kann ein Lochboden oder Fritte zum Einsatz kommen und soll möglichst einfach und mit geringem Aufwand komplett austauschbar sein, um Anpassungen, Optimierungen oder eine vollständige Ersetzung vornehmen zu können.

Vorwärmung Fluidisierungsgas: Eine Möglichkeit zur Vorwärmung des Fluidisierungsgases mit unabhängiger Regelung zum Reaktor soll vorgesehen werden.

Entleerung / Entnahme von Bettmaterial: Überlegung zur möglichst einfachen und effektiven Entnahme bzw. Entleerung des Bettmaterials soll angestellt und realisiert werden.

Kamin: Für den Erstentwurf der Anlage stellt der Anschluss zum Kamin den konstruktiven Abschluss der Apparatur dar, soll jedoch gleichzeitig die Schnittstelle für den Anbau von weiterem Equipment wie Filter, Zyklon oder Messequipment zur Abgasmessung darstellen und entsprechend eine Möglichkeit dafür bieten.

Elektrik / Elektronik: Der zum Betrieb notwendige elektrische und regelungstechnische Aufbau soll in einem direkt neben der Apparatur, an der Tragekonstruktion, befestigten Elektroschranks untergebracht werden.

Mobilität: Die Apparatur soll möglichst kompakt in Bezug auf Höhe und Abstellfläche und dadurch mobil ausgeführt werden, um flexibel hinsichtlich Aufstellungsort zu sein.

Messungen / Auswertung: Die Möglichkeit zur Auswertung, Messung und elektronischer Mitschrift aller notwendigen sowie betriebsrelevanten Temperaturen und Drücke ist vorzusehen.

4.2 Design und Planung

Im folgenden Kapitel werden die einzelnen Planungsphasen umrissen und damit die grundsätzliche Herangehensweise dokumentiert und wiedergegeben. Beginnend mit der schematischen Darstellung zur Festlegung des grundlegenden Funktionsumfangs der Apparatur folgt weiters die Beschreibung der konstruktiven Überlegungen sowie Dokumentation der durchgeführten Versuche.

4.2.1 Funktionsschema

Meist stellt die Grundlage eines Planungsprozesses das Funktionsschema dar, mit Hilfe dessen erste grundlegende Funktionsbeschreibungen und -überlegungen angestellt werden können. Als Basis und Referenzdarstellung für die in dieser Arbeit aufgebauten Apparatur und den damit verbundenen Planungsschritten, diente das in Abbildung 4.2-1 dargestellte Funktionsschema. Es zeigt das zentrale Konzept der Versuchsapparatur und ist, eine auf das wesentliche beschränkte Darstellung. Abbildung 4.2-1 zeigt zusammengefasst die in Kapitel 4.1 angeführten Anforderungen und Vorgaben, welche planungsrelevant sind. Im Zuge der Schemaerstellung wurde auch schon die Entscheidung zur Verwendung eines Rotameter anstatt eines Mass Flow Controller (MFC) sowie den Einsatz eines Lochbodens anstatt einer Fritte als Anströmboden festgelegt. Die Entscheidung hinsichtlich der Art der Brennstoffzufuhr, welche im Funktionsbild schematisch der realisierten Zufuhrmöglichkeit entspricht, wird im Folgenden näher erläutert.

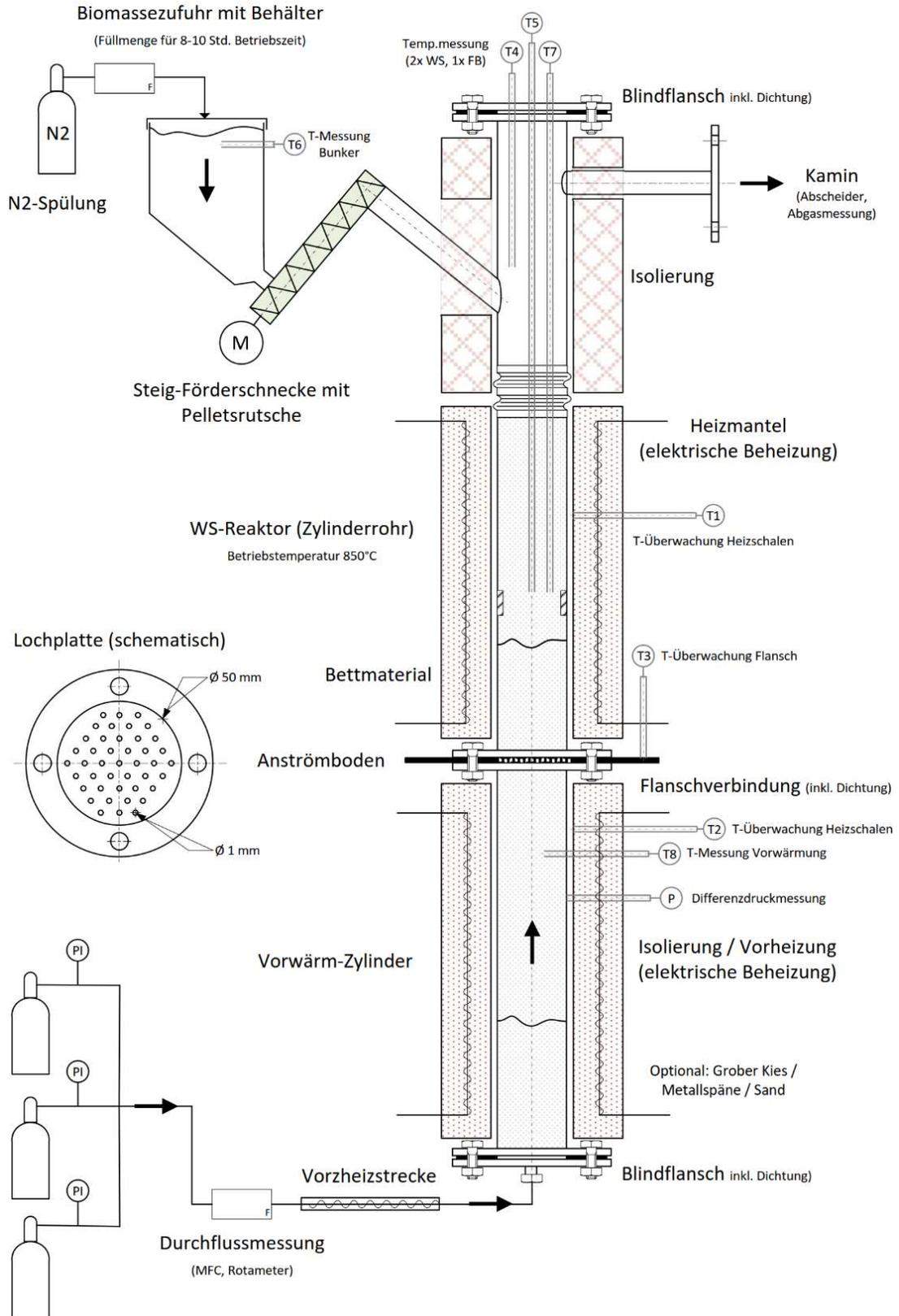


Abbildung 4.2-1: Funktionsschema Versuchsapparatur

4.2.2 Brennstoffzufuhr

Die Brennstoffzufuhr stellt bei jeder verfahrenstechnischen Anlage einen entscheidenden Anlagenteil dar, da hier ein großes Ausfall- und Fehlerpotential liegt. Eine nicht oder nur teilweise zufriedenstellende Brennstoffzufuhr kann zu erheblichen Problemen beim Betreiben der Anlage führen. Auch bedingt durch die oftmals nicht immer in gleichförmiger und gleichartiger Zusammensetzung vorliegende Biomasse, bedarf es einer besonders sorgfältigen Planung, Konstruktion und Ausführung der Brennstoffzufuhr, um das Gefahrenpotential geringstmöglich zu gestalten.

Durch die am Institut vorhandene Erfahrung mit Schneckenförderern wurde rasch für den Einsatz einer Schnecke entschieden, welche für die Anwendung mit Biomasse (BM) in Pelletform mit normierten Abmessungen (Größenklasse D06 bis D08, [36]) gut geeignet ist und ebenso einen kontinuierlichen Zuführbetrieb gewährleisten kann. Nachfolgende Abbildungen zeigen die in Betracht gezogenen Zufuhrsysteme, welche sich hinsichtlich Beschickungsposition und in weiterer Konsequenz der konstruktiven Ausführung deutlich unterscheiden.

Die in Abbildung 4.2-2 dargestellte Variante der Biomassezufuhr von oben hätte den Vorteil, dass seitlich um das Reaktorrohr keinerlei Einschränkungen hinsichtlich der Positionierung von Messstellen auftreten und die Anbringung von Isoliermaterial optimal erfolgen kann. Nachteilig ist hier der relativ geringe Abstand des von oben hineingeführten Rohres zur Innenwandung des Reaktorrohres. Zudem kommt es zu erhöhtem Austrag des Feinanteiles der eingebrachten Biomasse im Falle einer zu geringen Eintauchtiefe des Zuführrohres in den Reaktor. Ebenso ist die zwangsläufig resultierende hohe Gesamtbauhöhe der Apparatur zu beachten.

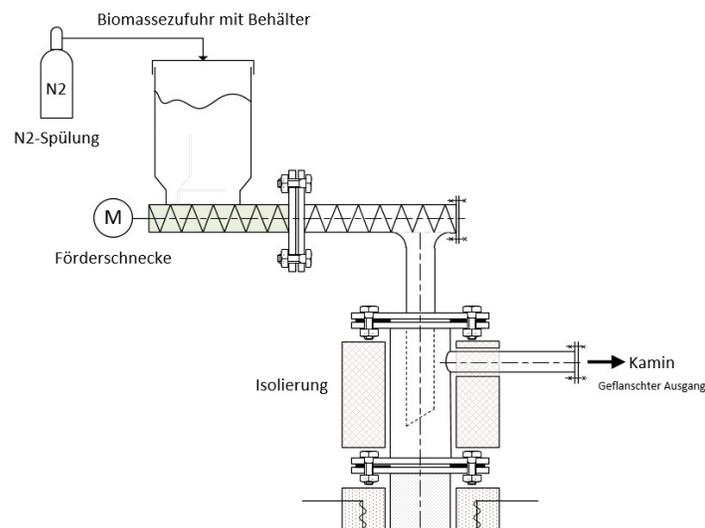


Abbildung 4.2-2: BM-Zufuhr Variante 1 (oben)

Die Variante der seitlichen Biomassezufuhr ermöglicht die Positionierung von Messstellen am oberen Flansch sowie die Realisierung einer angestrebten geringen Gesamtbauhöhe der Apparatur. Der entscheidende Nachteil ergibt sich durch das hohe Gefahrenpotential eines Rückbrandes in den BM-Bunker bei gefüllter oder verstopfter Dosierschnecke.

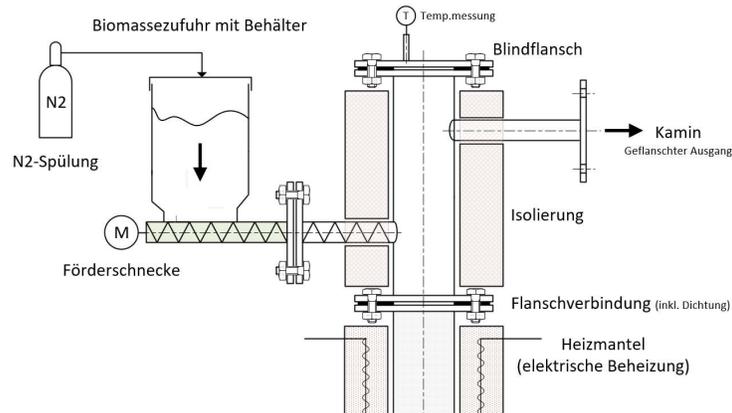


Abbildung 4.2-3: BM-Zufuhr Variante 2 (seitlich)

Die in Abbildung 4.2-4 dargestellte Variante entspricht der tatsächlich realisierten Brennstoff-Zuführeinheit. Diese Ausführung vereint die zuvor angeführten Vorteile und kann zudem das Risiko eines Rückbrandes auf ein akzeptables Minimum reduzieren.

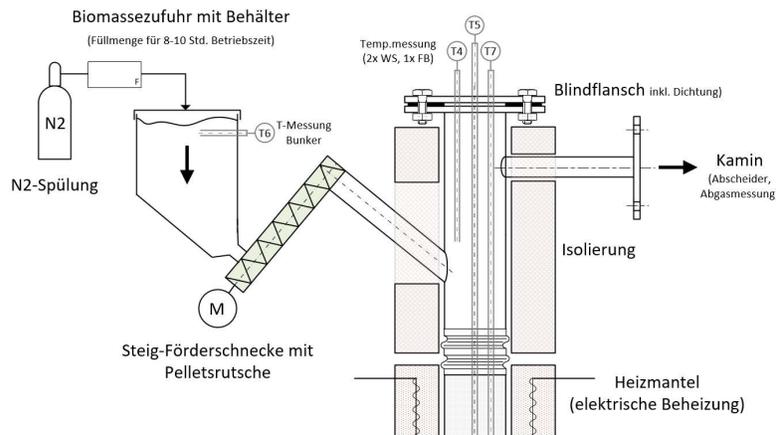


Abbildung 4.2-4: BM-Zufuhr Variante 3 (seitlich, Rutsche)

4.2.3 CAD Planung

Parallel dazu wurde während der gesamten Planungsphase ein 3D-CAD Modell (Software: PTC Creo Parametric – ProE [37]) erstellt, um frühzeitig allfällige konstruktive Schwierigkeiten erkennen und generelle Machbarkeitseinschätzungen anstellen zu können. Des Weiteren konnten damit auch rasch die voraussichtlichen Gesamtabmessungen abgelesen und notwendige Anpassungen noch vor der tatsächlichen Umsetzung vorgenommen werden. Die aus der 3D-Konstruktion abgeleiteten 2D-Pläne (Werkstattzeichnungen) stellten anschließend die Grundlage für den Fertigungsauftrag dar.

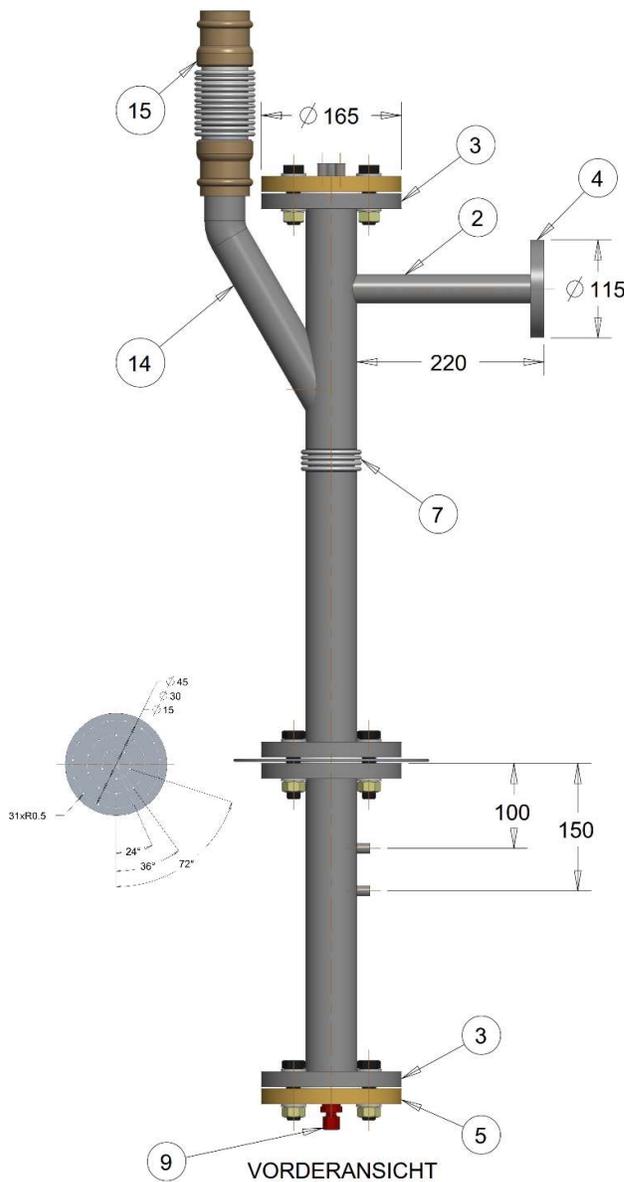


Abbildung 4.2-5: CAD Vorderansicht

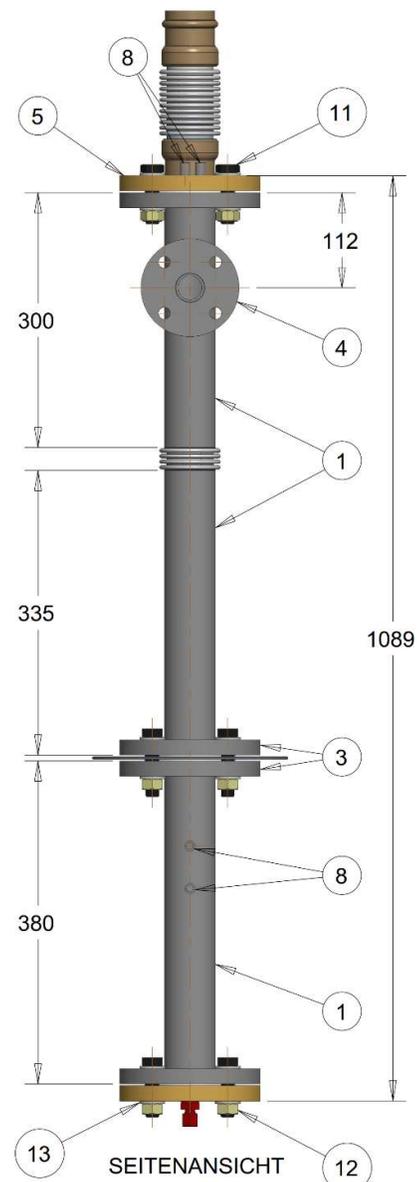
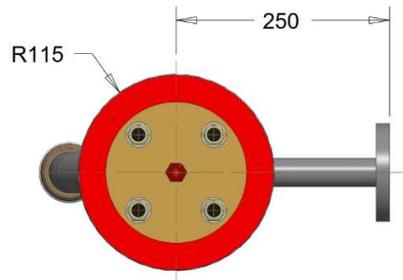


Abbildung 4.2-6: CAD Seitenansicht



DRAUFSICHT - unten

Abbildung 4.2-7: CAD Draufsicht

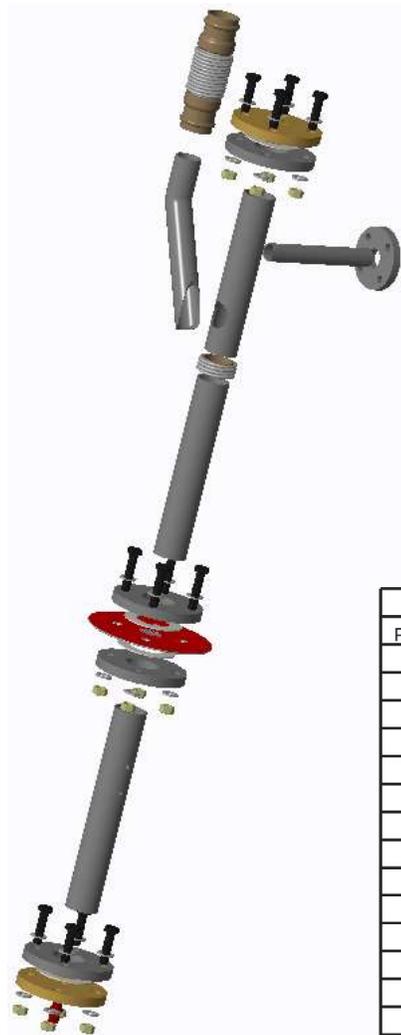


Abbildung 4.2-9: 3D-Explosionsdarstellung

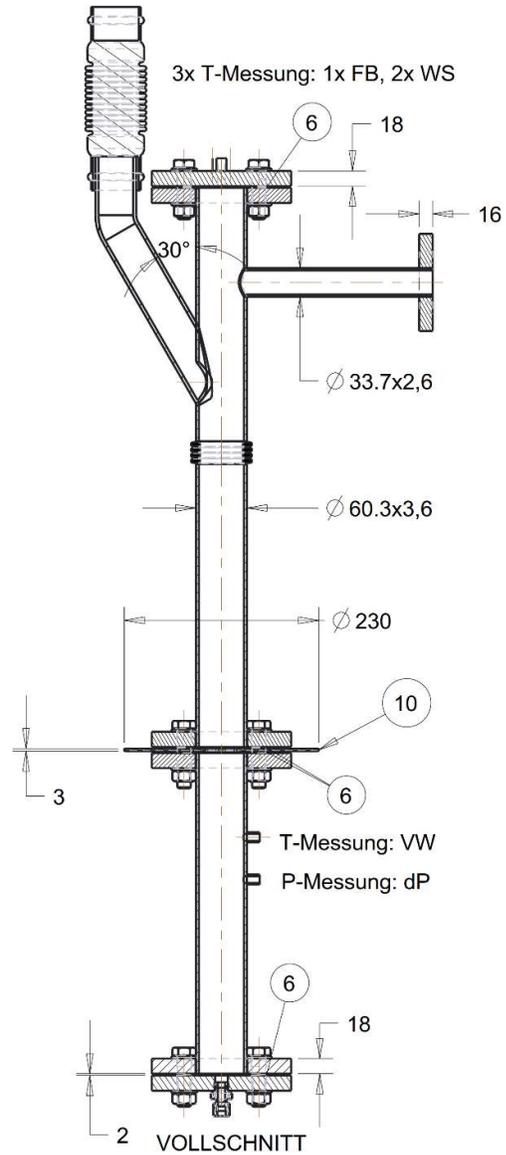


Abbildung 4.2-8: CAD Vollschnitt

Stückliste	
Pos.Nr.	Bezeichnung
1	Edelstahlrohr \varnothing 60.3x3.6mm, 1.4841, nahtlos
2	Edelstahlrohr \varnothing 33.7x2.6mm, 1.4841, nahtlos
3	Flansch DN50, Typ 11B, 1.4404, Vorschw.flansch
4	Flansch DN25, Typ 11B, 1.4301, Vorschw.flansch
5	Flansch DN50, Typ 05A, 1.4404, Blindflansch
6	Flachdichtung IBC, DN50
7	Axial-Wellrohrkompensator, DN50
8	gerade Verschraubung (T-/P-Messanschluss)
9	90° Verschraubung (Edelstahlwellschlauch)
10	Anströmboden, Lochplatte
11	Sechskantschaftschraube M16x70
12	Sechskantmutter M16
13	Beilagscheibe M16
14	Edelstahlrohr 1 1/2", gebogen, 1.4841, nahtlos
15	Edelstahlkomp. mit Geflecht, mech. Entkopplung

Abbildung 4.2-10: Stückliste CAD-Zeichnung

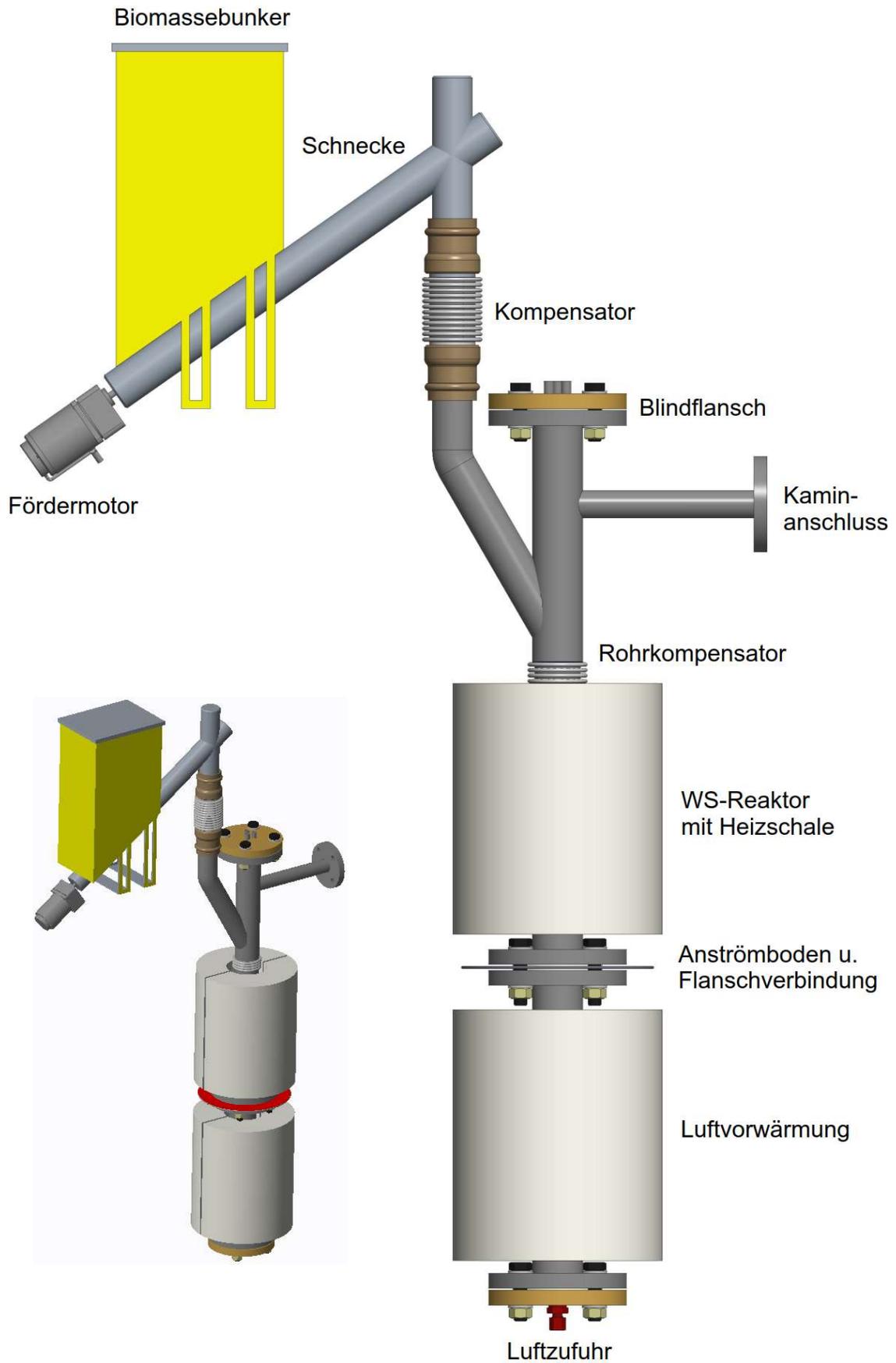


Abbildung 4.2-11: CAD Gesamtdarstellung

4.2.4 Messstellenpositionierung

Folgende Messstellen wurden zur Überwachung und Temperaturregelung der Apparatur vorgesehen (vgl. Abbildung 4.2-1) und in weiterer Konsequenz realisiert.

Tabelle 4.2-1: Messstellenliste

Messart	Position / Funktion
Temperaturmessung (T1)	<ul style="list-style-type: none"> - Überwachung der oberen Heizschale (Reaktor) - Digitale Aufzeichnung möglich - Max. Temp. laut Hersteller: 1150°C
Temperaturmessung (T2)	<ul style="list-style-type: none"> - Überwachung der unteren Heizschale (Vorwärmung) - Digitale Aufzeichnung möglich - Max. Temp. laut Hersteller: 1150°C
Temperaturmessung (T3)	<ul style="list-style-type: none"> - Überwachung Flanschverbindung - Digitale Aufzeichnung möglich - Max. Temp. laut Hersteller: 900°C (Flanschdichtung)
Temperaturmessung (T4)	<ul style="list-style-type: none"> - Messung Freeboard - Digitale Aufzeichnung möglich - Fixe Positionierung durch Verschraubung
Temperaturmessung (T5)	<ul style="list-style-type: none"> - Messung Wirbelschicht - Digitale Aufzeichnung möglich - Fixe Positionierung durch Verschraubung
Temperaturmessung (T6)	<ul style="list-style-type: none"> - Überwachung Brennstoffbunker - Digitale Aufzeichnung möglich - Fixe Positionierung durch Verschraubung
Temperaturmessung (T7)	<ul style="list-style-type: none"> - Regelung der oberen Heizschale (Reaktor) - Direkter Messeingang in PID-Regler 1 - Fixe Positionierung durch Verschraubung
Temperaturmessung (T8)	<ul style="list-style-type: none"> - Regelung der unteren Heizschale (Vorwärmung) - Direkter Messeingang in PID-Regler 2 - Fixe Positionierung durch Verschraubung
Druckmessung (P)	<ul style="list-style-type: none"> - Differenzdruckmessung (Vorwärmzylinder gegen Atmosphäre) - Rückschluss auf Festbett oder Wirbelschichtzustand - Digitale Aufzeichnung möglich - Fixe Positionierung durch Verschraubung

4.2.5 Werkstoffauswahl

Die Auswahl an Werkstoffen, welche den Temperaturansprüchen genügen, ist eine der ersten und wesentlichsten Überlegungen bei Wirbelschichtverbrennungsanlagen. In erster Linie gilt es den hohen Ansprüchen hinsichtlich Einsatztemperatur gerecht zu werden und zum anderen müssen ebenso die möglichen Abrieb- und Verschleißerscheinungen durch das Bettmaterial, im konkreten Fall Quarzsand, an den Innenwänden der Apparatur bedacht werden. Ein weiterer Punkt der bezüglich Materialauswahl in Betracht gezogen werden muss ist jener, der im Zusammenhang mit der vorgesehenen Betriebsweise steht. Gerade bei Versuchsapparaturen im Labormaßstab kommt es oft zu einer Vielzahl an An- und Abfahrvorgängen, also einer dementsprechend hohen Zahl an Aufheiz- bzw. Abkühlzyklen.

Auf Grundlage der eben genannten Überlegungen, wurde für Fluidisierungsmedium berührende Bauteile (Reaktor, Vorwärmzylinder, Axial-Rohrkompensator) und Oberflächen (Lochboden) ein hitzebeständiger Edelstahl 1.4841 mit einem Anwendungsbereich von 900°C bis 1120°C gewählt. [38] Rohre wurden ausschließlich in nahtloser Ausführung verwendet. Durch die hohe Wärmeabstrahlung und dem entsprechend geringeren thermischen Ansprüchen bzw. gleichzeitiger Kosteneinsparung, können die eingesetzten Flansche aus Edelstahl 1.4301 bzw. 1.4404 (Vorschweißflansch, Blindflansch) ausgeführt werden, um dennoch den grundlegenden Anforderungen zu genügen. Zusätzlich wurden die verwendeten Flansche auf den benötigten Innendurchmesser abgedreht und somit die Zylinderrohre (Reaktor, Vorwärmung) durchgesteckt werden, um sicherzustellen, dass das Fluidisierungsmedium entlang der hitzebeständigen Edelstahlrohre geführt wird.

Eine in Kapitel 4.4.5 angeführte Stückliste zeigt eine detaillierte Auflistung der, für den Stahlbau eingesetzten, Komponenten inklusive Werkstoff- und Normangaben.

4.3 Auslegung und Berechnung wirbelschichttechnischer Kennzahlen

Im folgenden Kapitel werden die zugrundeliegenden Berechnungen, zur Auslegung der im Zuge dieser Arbeit realisierten stationären Wirbelschichtapparatur, ausgeführt und erläutert. Auf Basis dieser Ergebnisse wurden die in Kapitel 4.4 dargestellten konstruktiven Ausführungen vorgenommen. Des Weiteren kann ein Vergleich der rechnerischen und experimentell ermittelten Ergebnissen, angestellt werden. Die Festlegung des zu verwendenden Bettmaterials, hinsichtlich Korngröße, wurde vorab definiert, um eine Referenzgröße zu schaffen, auf welche bei Ausführung der Berechnungen Bezug genommen werden kann.

4.3.1 Klassifikation nach Geldart

Die Klassifizierung des verwendeten Bettmaterials nach Geldart ergibt Gruppe B („Sandlike“). Dabei wurde Quarzsand mit einer mittleren Partikelgröße von $350\mu\text{m}$ und physikalischen Eigenschaften laut Herstellerangaben [40] herangezogen. Eine Einstufung des Bettmaterial, wie in Abbildung 4.3-1 gezeigt, gibt erste Rückschlüsse auf im Vorfeld getätigte Überlegungen bezüglich der zu erwartenden Fluidisierbarkeit sowie konstruktiver Ausführung. Bei besonders feinem oder groben Bettmaterial müssen hinzukommende Problematiken, wie stark zusammenhaftende Effekte bzw. erheblicher mechanischer Verschleiß durch Abrieb, mitberücksichtigt werden.

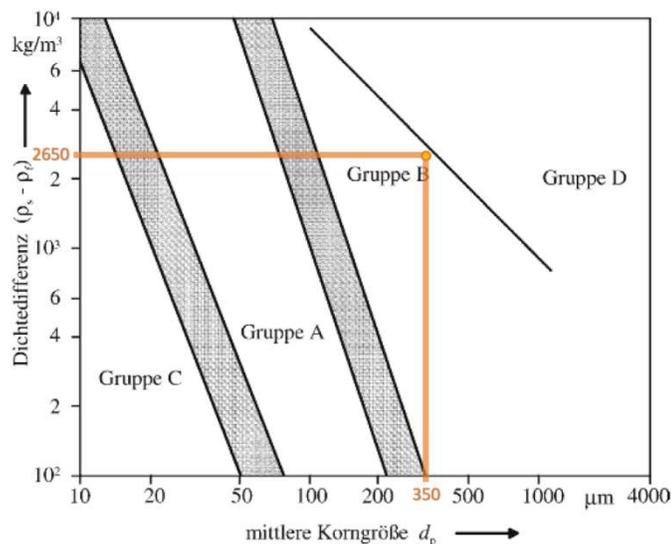


Abbildung 4.3-1: Klassifizierung nach Geldart (modifiziert) [23] - Quarzsand

4.3.2 Lockerungs- und Schwebegeschwindigkeit

Speziell wenn es sich um eine erste Auslegungsberechnung handelt, muss stets versucht werden, den Anwendungsbereich möglichst breit zu gestalten. Im konkreten Fall bedeutet dies, dass, obwohl die nachfolgenden Berechnungen mit der Festlegung ein Bettmaterial von $d_p=350\mu\text{m}$ zu verwenden durchgeführt wurden, dennoch nicht außer Acht gelassen werden darf, welche konstruktiven Einflüsse ein wesentlich gröberes Bettmaterial (z.B. Quarzsand mit $d_p=700\mu\text{m}$) mit sich bringen würde. Ebenso sollte bei der Auswahl des Equipments, wie dem Rotameter und zugehörigen Anströmleitungen, ein entsprechend passender Messbereich und Leitungsdimension gewählt werden, um nicht auf einen sehr engen Korngrößenbereich limitiert zu sein. Mit einigen Ausnahmen, wie dem Lochboden, welcher grundsätzlich dem eingesetzten Bettmaterial und vorgesehener Betriebsweise entsprechend angepasst und ausgelegt werden sollte.

Die wichtigsten Werte in Bezug auf Einzelpartikel und Haufwerk sind wie folgt:

Tabelle 4.3-1: Werte zu Einzelpartikel und Haufwerk

Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Partikeldurchmesser	d_p	350	$[\mu\text{m}]$
Formfaktor	Φ	0,9	$[-]$
Partikeldichte	ρ_p	2650	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
Schüttdichte	ρ_b	1500	$[\text{kg}/\text{m}^3]$

Bei dem vorliegenden Quarzsand handelt es sich um sehr homogenen und relativ stark abgerundeten Sand und rechtfertigt damit die Annahme des Formfaktors von nahe 1 (Kugelform).

Daraus ergibt sich ein Sauter-Durchmesser von:

$$d_{sv} = \Phi \cdot d_p = 0,9 \cdot 350 = \underline{315\mu\text{m}} \quad (4.3.1)$$

Die Berechnung der Porosität für das Festbett ergibt nach Umformung folgenden Wert:

$$\varepsilon_{FB} = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} = 1 - \frac{1500}{2650} = \underline{0,43} \quad (4.3.2)$$

Ein für Wirbelschichten üblicher Praxiswert der Porosität am Lockerungspunkt liegt zwischen 0,4 – 0,45. Es wird angenommen, dass im Festbett die lockerste Schüttung vorliegt und keine Vibrationen das Sandbett verdichtet haben. Der berechnete Wert für die Porosität stellt im weiteren ebenso die Porosität am Lockerungspunkt dar und damit gilt $\varepsilon_{FB} = \varepsilon_L$.

Zur Berechnung der Lockerungsgeschwindigkeit ist die Ermittlung der Archimedes-Zahl notwendig, welche sich ausschließlich aus Stoffgrößen und der Erdbeschleunigung berechnen lässt. Dabei ist zu beachten, dass der Partikeldurchmesser mit 3. Potenz in die Gleichung eingeht und keine Geschwindigkeit enthält. Damit stellt sich ein konstanter Wert für Betrieb vom Lockerungs- bis zum Schwebepunkt ein.

$$Ar = \frac{\rho_g \cdot d_{sv}^3 \cdot (\rho_p - \rho_g) \cdot g}{\mu_g^2} \quad (4.3.3)$$

Mit folgender Gleichung kann für den gesamten Reynoldsbereich von 0,001 – 4000 die Lockerungsgeschwindigkeit berechnet werden:

$$U_L = \frac{\mu_g}{\rho_g \cdot d_{sv}} \cdot (\sqrt{33,7^2 + 0,0408 \cdot Ar} - 33,7) \quad (4.3.4)$$

Die in Tabelle 4.3-2 zusammengefassten Ergebnisse der Ar-Zahl und Lockerungsgeschwindigkeit für 20°C und 850°C zeigen den massiven Unterschied der Größenordnung, welche im Wesentlichen durch den Dichte- und Viskositätsunterschied der ausgedehnten Luft bei Betriebstemperatur gegenüber den Stoffwerten im Anfahrbetrieb bei näherungsweise Raumtemperatur, hervorgeht. Dabei ist anzumerken, dass die Viskosität quadratisch in Glg. (4.3.3) eingeht und somit entsprechend stark gewichtet wird. Ebenso ist die Kenntnis der Lockerungsgeschwindigkeit und im weiteren Sinne des Volumenstroms beim Anfahren für die Auslegung des Durchflussmessgerätes wesentlich, um theoretisch auch im Kaltbetrieb der Apparatur, strömungstechnisch relevante Versuche durchführen zu können.

Tabelle 4.3-2: Ergebnisse Ar-Zahl und Lockerungsgeschwindigkeit

Anfahrbetrieb – 20°C		Normalbetrieb – 850°C		
Symbol	Ergebnis	Symbol	Ergebnis	Einheit
Ar ₂₀	2974	Ar ₈₅₀	115	[-]
U _{L20}	0,084	U _{L850}	0,033	[m/s]

Entsprechend den Erwartungen, wird im Anfahrbetrieb mehr als die doppelte Lockerungsgeschwindigkeit benötigt, um den Übergang vom Festbett- in den Wirbelschichtbereich zu schaffen.

Tabelle 4.3-3: Verwendete Stoffwerte für Luft bei unterschiedlichen Temperaturen

Stoffwerte - Luft				
Anfahrbetrieb – 20°C		Normalbetrieb – 850°C		Einheit
Symbol	Wert	Symbol	Wert	
ρ_{g20}	1,2	ρ_{g850}	0,31	[kg/m ³]
μ_{g20}	$18,1 \cdot 10^{-6}$	μ_{g850}	$46,8 \cdot 10^{-6}$	[kg/m·s]

Die obere Begrenzung des Wirbelschichtbereiches stellt die Schwebegeschwindigkeit dar und wird mit folgendem Ansatz berechnet: Hier gilt es zuerst den Strömungsbereich (Laminarer-, Übergangs-, Turbulenter Bereich) festzulegen, um entsprechend dem Widerstandsgesetz den zu verwendenden Beiwert zu berechnen, welcher wiederum als Divisor in der Gleichung für die Schwebegeschwindigkeit zu finden ist.

Ein Wert von $Re < 0,2$ definiert den Bereich der laminaren Strömung, welcher bei 20°C bereits am Lockerungspunkt nicht mehr zutreffend ist. Damit wird zur Berechnung der Schwebegeschwindigkeit der Übergangsbereich als vorherrschender Strömungszustand definiert. Im Zusammenhang mit der Wirbelschichttechnik befindet man sich strömungstechnisch zumeist im Übergangsbereich.

Re-Zahl am Lockerungspunkt bei 20°C:

$$Re_{L20} = \frac{\rho_{g20} \cdot U_{L2} \cdot d_{sv}}{\mu_{g20}} = \frac{1,2 \cdot 0,084 \cdot 315 \cdot 10^{-6}}{18,1 \cdot 10^{-6}} = \underline{1,75} \quad (4.3.5)$$

Für den Übergangsbereich ist die explizite Berechnung der Schwebegeschwindigkeit nicht mehr möglich und wird daher iterativ bestimmt. Nach nur wenigen Iterationsschritten kann eine Geschwindigkeit in guter Näherung zur tatsächlichen Sinkgeschwindigkeit berechnet werden. Bei, theoretisch möglicher, Ausführung von unendlich vielen Iterationsschritten könnte ein dementsprechend exakter Wert für die Schwebegeschwindigkeit ermittelt werden (U_{S_∞}).

Iterationsverfahren:

$$Re_{20,1} = 100$$

$$C_{w20,1} = \frac{24}{Re_{20,1}} + \frac{4}{\sqrt{Re_{20,1}}} + 0,4 = \underline{1,04} \quad (4.3.6)$$

Iterationsschritt 1:

$$U_{S20,1} = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{(\rho_p - \rho_{g20}) \cdot d_{sv} \cdot g}{\rho_{g20} \cdot C_{w20,1}}} = \underline{2,96 \frac{m}{s}} \quad (4.3.7)$$

$$Re_{20,2} = \frac{\rho_{g20} \cdot U_{S20,1} \cdot d_{sv}}{\mu_{g20}} = \underline{61,75} \quad (4.3.8)$$

$$C_{w20,2} = \frac{24}{Re_{20,2}} + \frac{4}{\sqrt{Re_{20,2}}} + 0,4 = \underline{1,3} \quad (4.3.9)$$

Iterationsschritt 2:
$$U_{S2,2} = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{(\rho_p - \rho_{g20}) \cdot d_{sv} \cdot g}{\rho_{g20} \cdot C_{w20,2}}} = \underline{2,65 \frac{m}{s}} \quad (4.3.10)$$

$$Re_{20,3} = \frac{\rho_{g20} \cdot U_{S20,2} \cdot d_{sv}}{\mu_{g20}} = \underline{55,28} \quad (4.3.11)$$

$$C_{w20,3} = \frac{24}{Re_{20,3}} + \frac{4}{\sqrt{Re_{20,3}}} + 0,4 = \underline{1,37} \quad (4.3.12)$$

Iterationsschritt 3:
$$U_{S20,3} = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{(\rho_p - \rho_{g20}) \cdot d_{sv} \cdot g}{\rho_{g20} \cdot C_{w20,3}}} = \underline{2,57 \frac{m}{s}} \quad (4.3.13)$$

Bei gleicher Herangehensweise für die Betriebstemperatur von 850°C, ergibt sich eine Re-Zahl am Lockerungspunkt, welche im Bereich der laminaren Strömung liegt. Mit der unwahrscheinlichen Annahme, dass auch der Schwebepunkt im laminaren Bereich liegt, ergibt eine Berechnung folgende Ergebnisse:

$$Re_{L850} = \frac{\rho_{g850} \cdot U_{L85} \cdot d_{sv}}{\mu_{g850}} = \frac{0,31 \cdot 0,033 \cdot 315 \cdot 10^{-6}}{46,8 \cdot 10^{-6}} = \underline{0,07} \quad (4.3.14)$$

Laminarer Bereich:
$$U_{S850} = \frac{(\rho_p - \rho_{g850}) \cdot d_{sv}^2 \cdot g}{18 \cdot \mu_{g850}} = \underline{3,06 \frac{m}{s}} \quad (4.3.15)$$

Iterationsverfahren analog zu Glg. (4.3.6) – (4.3.13), beginnend mit $Re_{850,1} = 8$, ergibt:

$$U_{S850,3} = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{(\rho_p - \rho_{g20}) \cdot d_{sv} \cdot g}{\rho_{g20} \cdot C_{w20,3}}} = \underline{2,23 \frac{m}{s}} \quad (4.3.16)$$

Partikel, welche bei U_L ausgetragen werden, können nach Umstellen der Grund-Glg. (4.3.15) wie folgt berechnet werden und betrifft, erwartungsgemäß, den Feinstaubanteil:

$$d_{L_Austrag} \leq \sqrt{\frac{18 \cdot \mu_g \cdot U_L}{(\rho_p - \rho_g) \cdot g}} \quad (4.3.17)$$

Tabelle 4.3-4: Ergebnis Partikelaustrag bei Lockerungsgeschwindigkeit

Symbol	Ergebnis	Einheit
d_{L20}	$\leq 32,5$	$[\mu\text{m}]$
d_{L850}	$\leq 32,9$	$[\mu\text{m}]$

4.3.3 Arbeitspunkt der Wirbelschichtapparat

Die Ermittlung des idealen Arbeitspunktes wird unter Verwendung von Zustandsdiagrammen vorgenommen. Diese stellen in grafischer Form die wesentlichen Existenzbereiche von Wirbelschichten dar. Unter Anwendung dimensionsloser Kennzahlen kann der Arbeitsbereich der Wirbelschicht sowie Grenzen vom Zustand des Festbettes bis zur Austragung nachvollzogen und grafisch aufbereitet werden. Die in dieser Arbeit verwendeten derartigen Diagramme zur grafischen Ermittlung des Arbeitspunktes sind jene nach Grace [22] und Reh [20].

nach GRACE: Auf den beiden Achsen des Diagramms nach Grace finden sich die dimensionslose Leerrohrgeschwindigkeit (U^*) und der dimensionslose Partikeldurchmesser (d_p^*). Um eine numerische Auswertung der nachfolgenden beiden Gleichungen anstellen zu können, müssen Stoffwerte des Fluidisierungsmediums, Bettmaterials und die Lockerungsgeschwindigkeit (Grenzzustand von Festbett zu Wirbelschicht, vgl. Kapitel 4.3.2) bekannt sein.

$$U_{LP}^* = U_L \cdot \left(\frac{\rho_g^2}{\mu_g \cdot g \cdot (\rho_p - \rho_g)} \right)^{\frac{1}{3}} = \frac{Re_L}{(Ar)^{\frac{1}{3}}} \quad (4.3.18)$$

$$d_p^* = d_{sv} \cdot \left(\frac{g \cdot \rho_g^2 \cdot (\rho_p - \rho_g)}{\mu_g^2 \cdot \rho_g} \right)^{\frac{1}{3}} = (Ar)^{\frac{1}{3}} \quad (4.3.19)$$

Eine Auswertung für die Temperaturen 20°C und 850°C (am Lockerungspunkt) ergeben folgende Werte:

Tabelle 4.3-5: Ergebnis dimensionslose Kennzahlen - nach Grace

Anfahrbetrieb – 20°C		Normalbetrieb – 850°C		Einheit
Symbol	Ergebnis	Symbol	Ergebnis	
U_{LP20}^*	0,12	U_{LP850}^*	0,01	[-]
d_{p20}^*	14,38	d_{p850}^*	4,86	[-]

Das nun mögliche Eintragen der berechneten dimensionslosen Werte, gültig am Lockerungspunkt, in das Grace-Diagramm stimmt auch mit der darin grafisch dargestellten Grenzlinie für den Lockerungsbereich in guter Näherung überein (vgl. Abbildung 4.3-2).

KAPITEL 4 – PRAKTISCHER TEIL

Der, den Anforderungen entsprechend, ideale Arbeitspunkt kann nun rein grafisch, durch verschieben des Punktes entlang der gedachten Erweiterung der y-Ache, oder durch Festlegung einer Vielfachheit der Lockerungsgeschwindigkeit dargestellt werden. In der Praxis werden bei Temperaturen um 850°C Anlagen oftmals mit der 8- bis 12-fachen Lockerungsgeschwindigkeit betrieben. Die hier rein grafische Herangehensweise ergibt für den in Abbildung 4.3-2 gesetzten Arbeitspunkt (AP) für 850°C (AP_{850}) eine Vielfachheit von 10 bezogen auf die Lockerungsgeschwindigkeit. Analog ergibt sich für den eingetragenen Arbeitspunkt für 20°C (AP_{20}) die 5-fache Lockerungsgeschwindigkeit. Die möglichst genaue Positionierung zwischen den oberen und unteren Grenzbereichen wird hier als der ideale AP betrachtet und festgelegt.

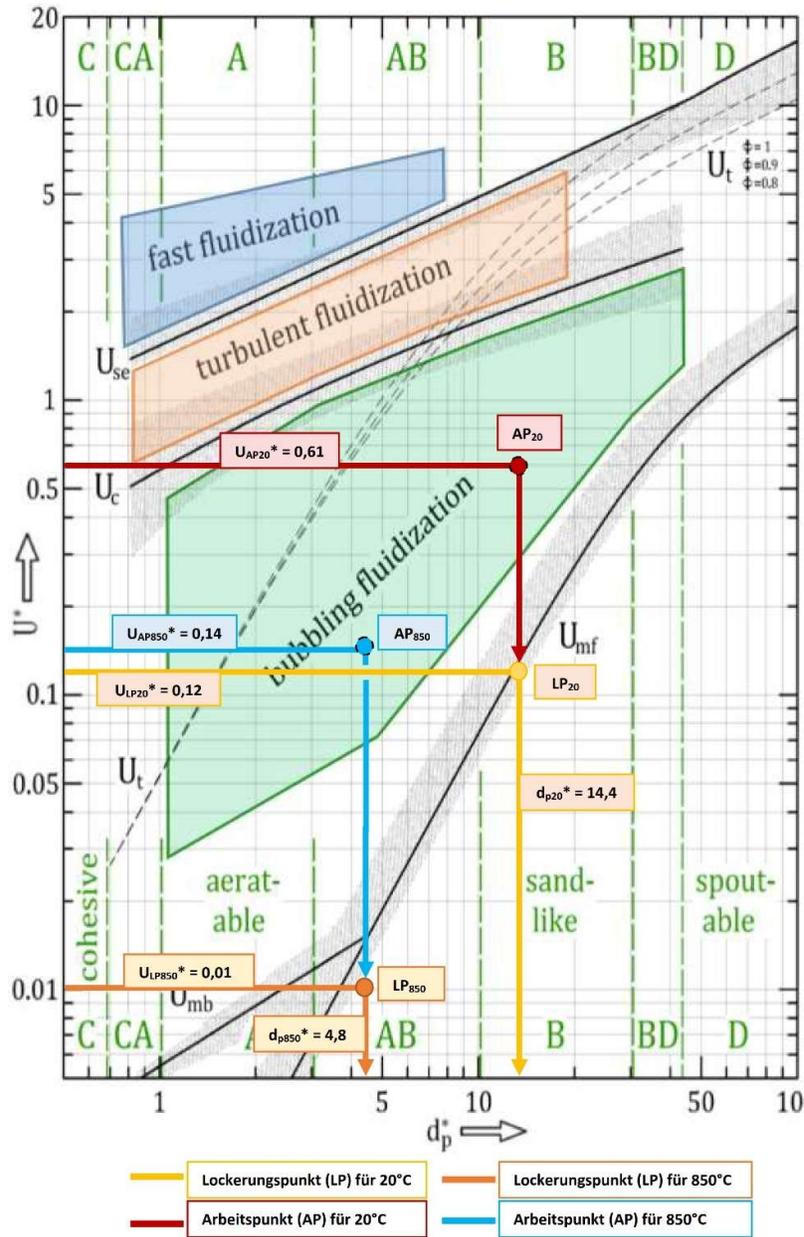


Abbildung 4.3-2: Arbeitspunkt (grafisch) - nach Grace (modifiziert)

In Tabelle 4.3-6 werden die eben ermittelten Werte zusammengefasst und zusätzlich die sich daraus ergebenden Strömungsgeschwindigkeiten am Arbeitspunkt (U_{AP20_Grace} , U_{AP850_Grace}), auf Basis der in Kapitel 4.3.2 berechneten Lockerungsgeschwindigkeiten und der eben grafisch ermittelten Vielfachheiten, angeführt.

Tabelle 4.3-6: Ergebnis Arbeitspunkt - nach Grace

Anfahrbetrieb – 20°C		Normalbetrieb – 850°C		
Symbol	Ergebnis	Symbol	Ergebnis	Einheit
U_{AP20}^*	0,61	U_{AP850}^*	0,14	[-]
U_{AP20_Grace}	0,42	U_{AP850_Grace}	0,33	[m/s]
5-fache Lockerungsgeschw.		10-fache Lockerungsgeschw.		-

Die sich in weiterer Folge ergebenden Volumenströme für den Lockerungspunkt als auch Arbeitspunkt werden wie folgt berechnet:

$$\text{Reaktordimension: } A_{Reaktor} = \frac{d_i^2 \cdot \pi}{4} = \frac{53,1^2 \cdot \pi}{4} = \underline{2214,52 \text{ mm}^2} \quad (4.3.20)$$

$$\text{Volumenstrom: } \dot{V}_{LP} = U_{LP} \cdot A_{Reaktor} \quad (4.3.21)$$

Umrechnung auf Normzustand ($p_N=1,013\text{bar}$, $T_N=273,15\text{K}$) mit $N = \text{Norm}$, $U = \text{Umgebung}$:

$$\text{Ideale Gasgleichung: } p_N \cdot V_N = n \cdot R \cdot T_N \quad (4.3.22)$$

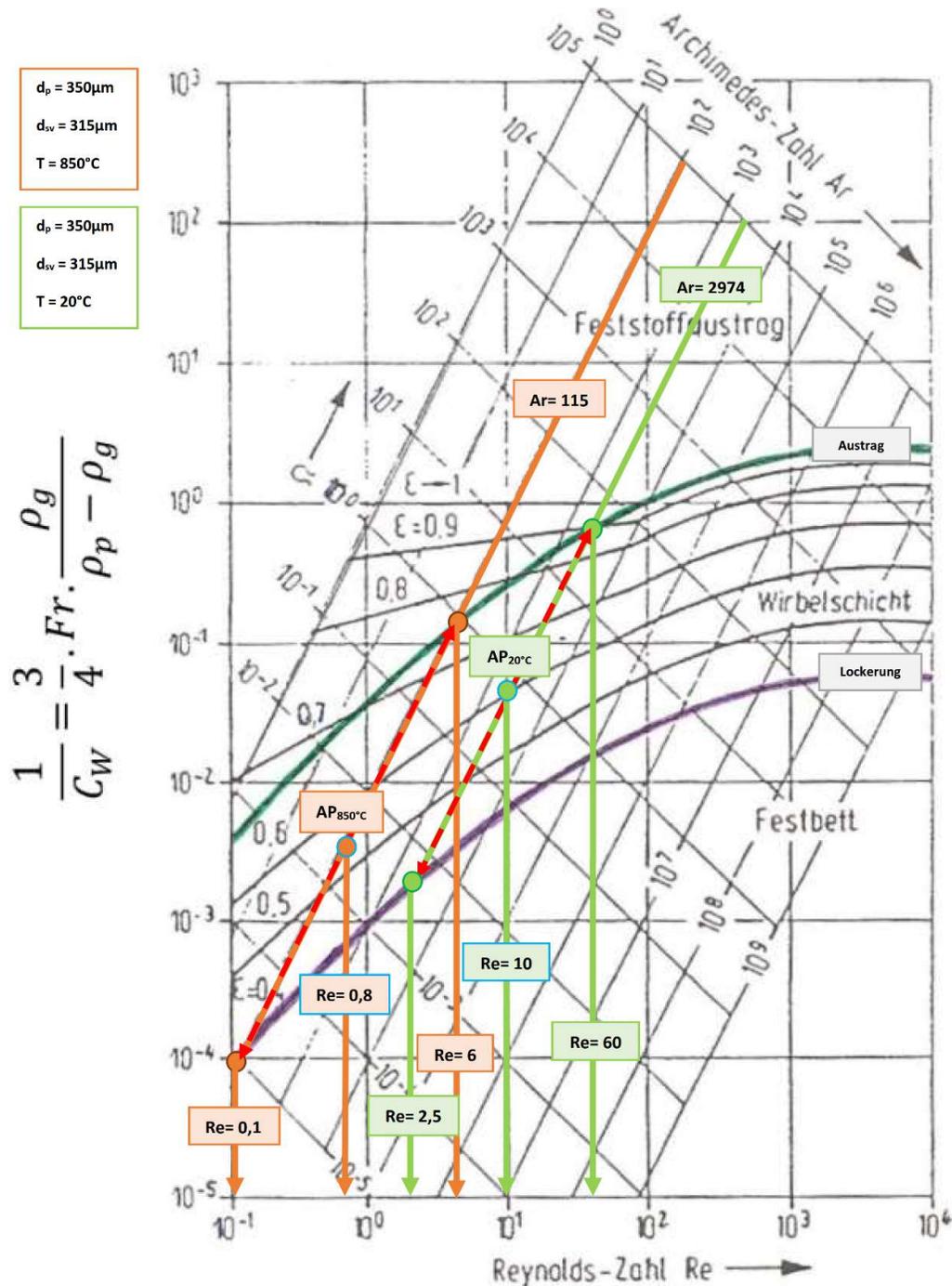
$$\frac{p_N \cdot V_N}{T_N} = \frac{p_U \cdot V_U}{T_U} \rightarrow V_N = V_U \cdot \frac{p_N \cdot V_N}{T_N} \quad (4.3.23)$$

Tabelle 4.3-7: Ergebnis Volumenstrom - nach Grace

Anfahrbetrieb – 20°C		Normalbetrieb – 850°C		
Symbol	Ergebnis	Symbol	Ergebnis	Einheit
\dot{V}_{LP20_Grace}	11,2	\dot{V}_{LP850_Grace}	4,4	[l/min]
\dot{V}_{AP20_Grace}	55,8	\dot{V}_{AP850_Grace}	44,3	[l/min]
$\dot{V}_{LP20_Norm_Grace}$	10,4	$\dot{V}_{LP850_Norm_Grace}$	1,1	[Nl/min]
$\dot{V}_{AP20_Norm_Grace}$	52,0	$\dot{V}_{AP850_Norm_Grace}$	10,8	[Nl/min]

nach REH: Die Vorgehensweise bei Verwendung des Zustandsdiagramms nach Reh ist ähnlich und führt ebenso über die Berechnung dimensionsloser Kennzahlen (Ar-Zahl) zur grafischen Darstellung einer Arbeitsgeraden. Die Ergebnisse (Arbeitsgeraden) nach Gl. 4.3.24 wurden für beide Referenztemperaturen direkt im Reh-Diagramm eingetragen (vgl. Abbildung 4.3-3).

$$Ar = \frac{\rho_g \cdot d_{sv}^3 \cdot (\rho_p - \rho_g) \cdot g}{\mu^2} \quad (4.3.24)$$



Nach Eintragung der Arbeitsgeraden, können die Werte der Reynoldszahl für die unterschiedlichen Zustandsbereiche auf der x-Achse abgelesen werden und mit nachfolgender Gleichung die entsprechenden Geschwindigkeiten berechnet werden. Die in Tabelle 4.3-8 angeführten Vielfachheiten ergeben sich durch die grafische Festlegung der AP im Diagramm.

Folgende Gleichung ergibt die korrespondierenden Strömungsgeschwindigkeiten:

$$Re = \frac{\rho_g \cdot U \cdot d_{sv}}{\mu_g} \rightarrow U = \frac{Re \cdot \mu_g}{\rho_g \cdot d_{sv}} \quad (4.3.25)$$

Tabelle 4.3-8: Ergebnis Strömungsgeschwindigkeit, Austrag am LP - nach Reh

Anfahrbetrieb – 20°C		Normalbetrieb – 850°C		
Symbol	Ergebnis	Symbol	Ergebnis	Einheit
U_{LP20_Reh}	0,12	U_{LP850_Reh}	0,05	[m/s]
U_{S20_Reh}	2,87	U_{S850_Reh}	2,88	[m/s]
U_{AP20_Reh}	0,48	U_{AP850_Reh}	0,38	[m/s]
d_{L20}	≤ 38,8	d_{L850}	≤ 39,4	[µm]
4-fache Lockerungsgeschw.		8-fache Lockerungsgeschw.		-

Die Berechnung der zugehörigen Volumenströme erfolgt analog zur Berechnung nach Grace unter Verwendung von Glg. (4.3.20) – (4.3.23).

Tabelle 4.3-9: Ergebnis Volumenstrom - nach Reh

Anfahrbetrieb – 20°C		Normalbetrieb – 850°C		
Symbol	Ergebnis	Symbol	Ergebnis	Einheit
\dot{V}_{LP20_Reh}	15,9	\dot{V}_{LP850_Reh}	6,4	[l/min]
\dot{V}_{AP20_Reh}	63,6	\dot{V}_{AP850_Reh}	50,9	[l/min]
$\dot{V}_{LP20_Norm_Reh}$	14,8	$\dot{V}_{LP850_Norm_Reh}$	1,55	[NI/min]
$\dot{V}_{AP20_Norm_Reh}$	59,3	$\dot{V}_{AP850_Norm_Reh}$	12,4	[NI/min]

Ein Vergleich der Werte aus den empirischen Gleichungen mit jenen nach Reh zeigen erkennbare Unterschiede, welche dennoch im akzeptablen Bereich sind (vgl. Tabelle 4.3-10). Die Werte nach Reh ergeben für alle Vergleichswerte ein numerisch höheres Ergebnis. Bei Vergleich der Schwebegeschwindigkeiten ergibt sich eine Abweichung der Werte um den Faktor 1,1–1,3. Hingegen steigt diese Abweichung bei den Lockerungsgeschwindigkeiten um den Faktor 1,5–1,6. Das Arbeiten mit dem Diagramm nach Reh hat den Nachteil, dass es großen Spielraum für Ungenauigkeiten birgt und eine Bestimmung der Geschwindigkeiten auf zwei Kommastellen praktisch nicht möglich ist.

Tabelle 4.3-10: Vergleich Ergebnisse - Berechnung / Reh

Berechnung		nach REH		
Symbol	Ergebnis	Symbol	Ergebnis	Einheit
Anfahrbetrieb – 20°C				
U_{LP20}	0,08	U_{LP20_Reh}	0,12	[m/s]
U_{S20}	2,57	U_{S20_Reh}	2,87	[m/s]
Normalbetrieb – 850°C				
U_{LP850}	0,03	U_{LP850_Reh}	0,05	[m/s]
U_{S850}	2,23	U_{S850_Reh}	2,88	[m/s]
\dot{V}_{S850_Norm}	72	$\dot{V}_{S850_Norm_Reh}$	92,9	[NI/min]

Die Austragungsgeschwindigkeiten sind erwartungsgemäß sehr hoch und werden aufgrund der Auswahl des Rotameters (begrenzter Messbereich) nicht erreicht.

Der Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten und des daraus resultierenden Volumenstroms für die grafisch ermittelten Arbeitspunkte zeigen eine gute Übereinstimmung. Hierbei ist anzumerken, dass die Arbeitspunkte direkt in den Zustandsdiagrammen eingetragen und anschließend die Werte berechnet wurden. Damit ergibt sich nach der rein grafischen Festlegung des Arbeitspunktes eine unterschiedliche Vielfachheit der Lockerungsgeschwindigkeiten (vgl. Tabelle 4.3-6 und Tabelle 4.3-8), welche sich dennoch in guter Näherung ähnlich sind. Den direkten Vergleich der Norm-Volumenströme, welche bei Ermittlung nach Reh stets höher sind, sind in nachfolgender Tabelle nochmals zusammengefasst. Eine andere Möglichkeit wäre, die Vielfachheit der Lockerungsgeschwindigkeit festzulegen und anschließend die Betriebspunkte in den Zustandsdiagrammen einzutragen, um deren Arbeitsbereich nachvollziehen zu können.

Tabelle 4.3-11: Vergleich Ergebnisse - Grace / Reh

nach GRACE		nach REH		
Symbol	Ergebnis	Symbol	Ergebnis	Einheit
Anfahrbetrieb – 20°C				
U_{AP20_Grace}	0,42	U_{AP20_Reh}	0,48	[m/s]
$\dot{V}_{LP20_Norm_Grace}$	10,4	$\dot{V}_{LP20_Norm_Reh}$	14,8	[NI/min]
$\dot{V}_{AP20_Norm_Grace}$	52,0	$\dot{V}_{AP20_Norm_Reh}$	59,3	[NI/min]
Normalbetrieb – 850°C				
U_{AP850_Grace}	0,33	U_{AP850_Reh}	0,38	[m/s]
$\dot{V}_{LP850_Norm_Grace}$	1,1	$\dot{V}_{LP850_Norm_Reh}$	1,55	[NI/min]
$\dot{V}_{AP850_Norm_Grace}$	10,8	$\dot{V}_{AP850_Norm_Reh}$	12,4	[NI/min]

4.3.4 Gasverteilerboden und Druckverlustberechnung

Der schon im ersten Teil dieser Arbeit theoretisch erläuterte Gasverteilerboden wird im Folgenden durch die Auslegungsberechnung weiter vertieft. Auf Grundlage der vorangegangenen Berechnungen und Annahmen gilt es die passende Konstellation von Anzahl, Durchmesser sowie Anordnung der Bohrungen zu finden und mit den in Kapitel 4.8 tatsächlich gemessenen Werten zu vergleichen.

Hinzukommend zu den schon angeführten Festlegungen kommen etwaige Einschränkungen durch konstruktive bzw. fertigungsbedingten Maßnahmen hinzu. Die Auslegung des Verteilerbodens, hier Lochboden, kann im weiteren Sinne als iterativer Vorgang bezeichnet werden, da eine Abstimmung von Lochdurchmesser, -anzahl sowie WS-Höhe notwendig ist, um ein ideales Druckverlustverhältnis von Verteilerboden zu Wirbelschicht, zu erreichen. Ebenso kommen in geringem Maße auch noch Einschränkungen betreffend Fertigung hinzu. Ebenso gilt es eine möglichst gleichmäßige Aufteilung der Löcher an der zur Verfügung stehenden Querschnittsfläche zu definieren.

Grundfläche WS:
$$A_{WS} = \frac{d_i^2 \cdot \pi}{4} = \frac{53,1^2 \cdot \pi}{4} = \underline{\underline{2214,52 \text{ mm}^2}} \quad (4.3.26)$$

Als Lochdurchmesser wurde aus fertigungstechnischen Gründen (Aufbohrung später noch möglich bzw. zu kleiner Bohrdurchmesser schwer zu realisieren) ein Durchmesser von 1mm festgelegt. Ebenso wurde eine Schütthöhe des Bettmaterials (=Höhe der WS am Lockerungspunkt) von 9 bis 10 cm definiert. Die Auslegung des Lochbodens wird in diesem Kapitel für den Betrieb bei 850°C ausgeführt und dabei die Ergebnisse aus den vorangegangenen Berechnungen nach Grace mit denen der erlangten Werte unter Verwendung des Zustandsdiagrammes nach Reh, am definierten Arbeitspunkt, verglichen.

Tabelle 4.3-12: Annahmen und Werte für Lochboden

Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Lochdurchmesser	d_0	1	[mm]
Schütthöhe	H_{WS}	90-100	[mm]
Lochbodendicke	s	3	[mm]

Grundfläche Loch:
$$A_{Loch} = \frac{d_0^2 \cdot \pi}{4} = \frac{1^2 \cdot \pi}{4} = \underline{\underline{0,785 \text{ mm}^2}} \quad (4.3.27)$$

Das in Kapitel 3.5.5 beschriebene Diagramm zur Ermittlung des erforderlichen Druckabfalls am Verteilerboden, ergibt bei einer gewählten Schütthöhe von $H=90\text{mm}$ ein theoretisch notwendiges Druckverlustverhältnis von Verteilerboden zu Wirbelschicht mit knapp 6% an. Welches wiederum die Theorie stützt, dass Wirbelschichten mit kleinem Durchmesser zu Höhe-Verhältnis mit weniger Druckabfall im Anströmboden auskommen.

$$\frac{\Delta P_D}{\Delta P_{B_{WS}}} = 0,01 + 0,2 \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{d_{i_{WS}}}{2 \cdot H}\right) \right] \quad \text{mit} \quad \frac{d_{i_{WS}}}{2 \cdot H} = \underline{0,295} \quad (4.3.28)$$

Der Druckabfall in der Wirbelschicht ergibt sich aus der fundamentalen Fluidisierungsgleichung nach Glg. (4.3.29). Ebenso kann der Druckverlust in der Wirbelschicht näherungsweise durch Anwendung von Glg. (4.3.33) ausgedrückt und berechnet werden. Der hier definierte (ideale) Druckabfall am Verteilerboden wurde mit 15% der Wirbelschicht festgelegt und stützt sich damit auf die in Kapitel 3.5.5 erläuterten Überlegungen (sh. Glg. (4.3.30)).

$$\Delta P_{B_{WS}} = (1 - \varepsilon_L) \cdot (\rho_p - \rho_g) \cdot g \cdot H_L \quad (4.3.29)$$

$$\Delta P_{D_{ideal}} = 0,15 \cdot \Delta P_{B_{WS}} \quad (4.3.30)$$

Näherungsweise Ermittlung des Wirbelschichtdruckverlustes mit vordefinierter Schütthöhe:

$$V_{Sc\text{üttung}} = A_{WS} \cdot H = 2214,52 \cdot 90 = \underline{199306\text{ mm}^3} \quad (4.3.31)$$

$$M_{Schüttung} = V_{Sc\text{üttung}} \cdot \rho_b = 199306 \cdot 10^{-9} \cdot 1500 = \underline{0,299\text{ kg}} \quad (4.3.32)$$

$$\Delta P_{B_{Sc\text{üttung}}} = \frac{M_{Sc\text{üttung}} \cdot g}{A_{WS}} = \frac{0,299 \cdot 9,81}{2214,52 \cdot 10^{-6}} = \underline{0,013\text{ bar}} \quad (4.3.33)$$

$$\Delta P_{Gesamt} = \Delta P_{Lochboden} + \Delta P_{Wirbelschicht} \quad (4.3.34)$$

Tabelle 4.3-13: Ergebnisse Druckverlust

Normalbetrieb – 850°C		
Symbol	Ergebnis	Einheit
$\Delta P_{B_{WS850}}$	13	[mbar]
$\Delta P_{B_{WS850_Reh}}$	13	[mbar]
ΔP_{D850_ideal}	2	[mbar]
$\Delta P_{D850_Reh_ideal}$	2	[mbar]
$\Delta P_{B_Schüttung}$	13	[mbar]
ΔP_{Gesamt_850}	15	[mbar]
$\Delta P_{Gesamt_850_Reh}$	15	[mbar]

Die Wahl des Lochdurchmessers wurde mit $d_0=1\text{mm}$ festgelegt und liegt im unteren Grenzbereich der aus der Praxis bekannten Erfahrungswerten ($3 \cdot d_p < d_0 < 10 \cdot d_p$).

Der vom gewählten Lochdurchmesser (d_0) und der Plattendicke (s) des Lochbodens abhängige Widerstandsbeiwert ξ_0 ergibt sich zu:

$$\xi_0 = 1,5 \cdot \left(\frac{d_0}{s}\right)^{0,26} = 1,5 \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^{0,26} = \underline{1,13} \quad (4.3.35)$$

Da die Beziehung $\frac{d_0}{s} = 0,33$ außerhalb des Gültigkeitsbereiches ($1 < \frac{d_0}{s} < 10$) liegt, wird für den Widerstandsbeiwert $\xi_0 = 1,41$, nach [40] gewählt.

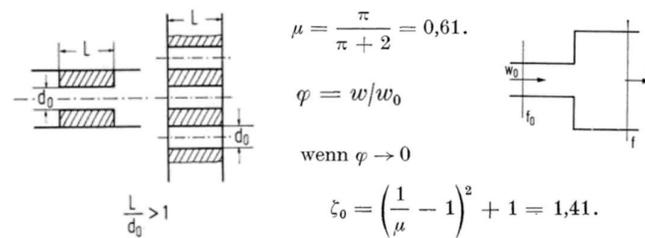


Abbildung 4.3-4: Widerstandsbeiwert - Lochplatte [40]

Die, durch den festgelegten (idealen) Druckverlust am Verteilerboden, erforderliche Lochgeschwindigkeit ergibt sich zu:

$$\Delta P_{D_ideal} = \xi_0 \cdot \frac{\rho g \cdot U_0^2}{2} \rightarrow U_0 = \sqrt[2]{\frac{2 \cdot \Delta P_{D_ideal}}{\xi_0 \cdot \rho g}} \quad (4.3.36)$$

Tabelle 4.3-14: Ergebnis Lochgeschwindigkeit

Normalbetrieb – 850°C		
Symbol	Ergebnis	Einheit
U_{0850}	30,2	[m/s]
U_{0850_Reh}	30,2	[m/s]

Das Freiflächenverhältnis f_0 (Sollwert: 1-5%), welches die Gesamtfläche der Löcher in Verhältnis zur Querschnittsfläche der Wirbelschicht setzt, wird nun wie folgt berechnet:

$$f_0 = \frac{U_{WB}}{\sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_D}{\xi_0 \cdot \rho g}}} = \frac{A_{Loch} \cdot N_{Loch}}{A_{WS}} = \frac{A_0}{A_{WS}} = \frac{U_{WB}}{U_0} \quad (4.3.37)$$

Mit den berechneten Werten für das Freiflächenverhältnis, lässt sich somit die erforderliche Lochanzahl ermitteln:

$$N = \frac{4 \cdot f_0 \cdot A_{WS}}{d_0^2 \cdot \pi} \quad (4.3.38)$$

Zuletzt gilt es noch die Teilung zu berechnen. Die Berechnung erfolgt hier nach der Dreieckteilung, da diese eine bessere Gasverteilung gegenüber der Quadratteilung durch gleichmäßigere Anordnung gewährleistet.

$$t_{Dreieck} = d_0 \cdot \left(\frac{\pi}{2 \cdot f_0 \cdot \sqrt{3}} \right)^{0,5} \quad (4.3.39)$$

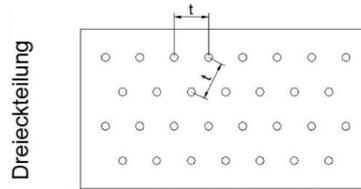


Abbildung 4.3-5: Dreieckteilung [15]

Tabelle 4.3-15: Ergebnis Freiflächenverhältnis, Lochanzahl, Teilung

Normalbetrieb – 850°C		
Symbol	Ergebnis	Ergebnis
$f_{0850_{WS}}$	0,01	[-]
$f_{0850_{Reh}}$	0,013	[-]
N_{850}	27,9	[-]
$N_{850_{Reh}}$	32,1	[-]
t_{850}	9,6	[mm]
$t_{850_{Reh}}$	8,9	[mm]

Der in dieser Arbeit relevante und angefertigte Lochboden mit $N=31$ wurde aufgrund der runden Reaktor-Querschnittsfläche nach einer Kreisteilung gefertigt. Abbildung 4.3-6 zeigt die tatsächliche Ausführung, sowie eine Alternative, jedoch verworfene Anordnung, in Abbildung 4.3-7.

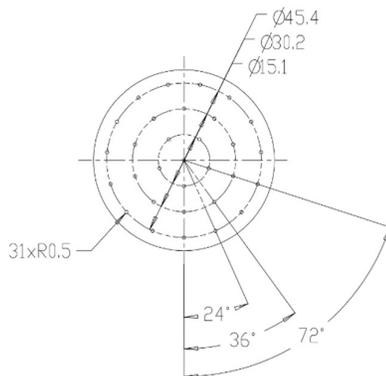


Abbildung 4.3-6: Lochboden

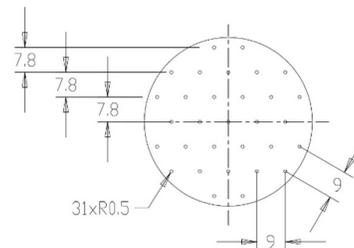


Abbildung 4.3-7: Lochboden Hex.-Teilung

4.3.5 Brennstoffmenge und -analyse

Um Aussagen und Vorgaben bezüglich der Anforderungen an die Brennstoffschnecke hinsichtlich Fördermenge geben zu können, ist eine Verbrennungsrechnung zur Ermittlung dieser Einschätzung eine entsprechende Möglichkeit. Voraussetzung dafür stellt die Kenntnis des verwendeten Brennstoffes mit zugehöriger Elementaranalyse dar.

In Tabelle 4.3-16 sind die Ergebnisse der Brennstoffproben für Holz- und Zwiebelschalenpellets zusammengefasst. Die Analysewerte der Holzpellets stellen die Referenzwerte zu den Zwiebelschalen dar. Dabei zeigt sich, dass die Proben sich in nahezu allen Eigenschaften deutlich unterscheiden. Wesentlich ist der deutlich höhere Kohlenstoffanteil sowie der niedrigere Stickstoff- und Wassergehalt der Holzpellets, was sich durch einen deutlich höheren zu erwartenden Heizwert ($>16,5$ MJ/kg) auswirkt. Hinsichtlich Schwefel- und Chlorgehalt gleichen die ZS-Pellets den strohhaltigen Biomassen, verglichen mit den Werten in Tabelle 3.1-4. Entscheidend zur Auswahl der Zwiebelschalenpellets ist jedoch der außerordentlich hohe Aschegehalt.

Tabelle 4.3-16: Biomasseproben Analyseergebnisse in Masse-% Trockenmasse

Biomasse	Holzpellets (HP)	Zwiebelschalenpellets (ZW)
Elementaranalyse		
Wassergehalt	6,4	10,08
Aschegehalt (550°C)	0,3	11,49
Kohlenstoff (C)	50,7	36,22
Wasserstoff (H)	5,9	4,02
Stickstoff (N)	0,2	0,76
Schwefel (S)	0,0	0,15
Chlor (Cl)	0,0	0,23
Sauerstoff (O)	36,5	37,05
flüchtige Bestandteile	n.a.	63,0
Brennwert (H_o) [kJ/kg]	20582	13536
Heizwert (H_u) [kJ/kg]	19094	12407

In Kapitel 3.1.5 und 3.1.8 wurde die theoretische Bedeutung und Definition dieser brennstoffspezifischen Analysewerte erläutert. Nachfolgend wird kurz auf deren praktische Bestimmung und zutreffende Norm eingegangen.

Elementaranalyse: Die Bestimmung der in einer Verbindung enthaltenen Elemente Kohlenstoff, Wasserstoff und Stickstoff wird zur elementaranalytischen Beschreibung einer organischen Probe durchgeführt und stellt ein Teilgebiet der analytischen Chemie dar. Die in dieser Arbeit verwendeten Analysen wurden nach Norm EN 15104 [41] durchgeführt.

Chlor- und Schwefelgehalt: Zur Ermittlung des Gesamtgehalts an Chlor und Schwefel wird die Probe in einer Verbrennungsbombe unter Sauerstoff verbrannt. Als Absorptionslösung wird Reinstwasser vorgelegt und im Anschluss filtriert. Die Analyse auf den Chlorid- und Sulfatgehalt wird mittels Ionenchromatographie durchgeführt [42]. Die Bestimmung erfolgt unter Anwendung der Norm EN 15289 [42].

Wassergehalt: Der Wassergehalt unter Anwendung der Norm EN 14774 [43] wird im Wesentlichen durch das Einwiegen einer bestimmten Mindestmenge in Schalen und anschließender mehrstündiger Trocknung bis Massenkonstanz bestimmt. Die Gewichts Differenz der Schalen mit Probe vor und nach dem Trocknungsvorgang ergibt den Wassergehalt.

Aschegehalt: Durch Erhitzung der Proben in einem Muffelofen entsprechend vorgegebenem Temperaturprogramm wird der Brennstoff bei 550°C für 120 Minuten gehalten und anschließend auf Raumtemperatur abgekühlt. Das Auswiegen der Proben vor bzw. nach dem Veraschungsvorgang bestimmt den Aschegehalt. Die zu diesem Zwecke angewendete Norm ist EN 14775 [31].

Aschebestandteile: Die Bestimmung der elementaren Zusammensetzung der Asche kann dazu verwendet werden, die Erweichungstemperatur in erster Näherung abschätzen, sowie den Einfluss der Bestandteile auf das Schmelzverhalten nachvollziehen, zu können. Eine Möglichkeit dafür stellt das in Kapitel 3.6.2 vorgestellte Dreiecksdiagramm dar. Die Analyse erfolgt durch eine Röntgenfluoreszenzspektroskopie zur qualitativen und quantitativen Bestimmung der enthaltenen Elemente einer Probe.

Sauerstoffgehalt: Der Sauerstoffgehalt ergibt sich als die Differenz auf 100% (vgl. Glg. 4.3.40)

Aus zeitlichen Gründen wurde für die in der Arbeit verwendeten Proben keine Analyse der Aschebestandteile in Auftrag gegeben. Zudem war das Ascheschmelzverhalten respektive Erweichungs- und Schmelztemperaturen der Proben weitestgehend bekannt.

Summe aller Massenanteile gleich 1:

$$c + h + s + o + n + a + w = 1 \quad (4.3.40)$$

Energiegehalt (H_u): Der bei technischen Feuerungen bedeutsamere Heizwert lässt sich exakt nur im Bombenkalorimeter, also experimentell, bestimmen und ist für Zwiebelschalen (ZS) in Tabelle 4.3-16 angegeben. Der Zusammenhang zwischen Brennwert- und Heizwert sowie die Näherungsgleichung für feste und flüssige Brennstoffe (nach Boie) [11] zur Bestimmung des Heizwertes sieht wie folgt aus:

$$H_o = H_u + r \cdot (9 \cdot h + w) \quad (4.3.41)$$

$$H_u = 34,8 \cdot c + 93,9 \cdot h + 6,3 \cdot n + 10,5 \cdot s - 10,8 \cdot o - 2,5 \cdot w \quad (4.3.42)$$

$$H_{u,ZS} = 34,8 \cdot 0,3622 + 93,9 \cdot 0,0402 + 6,3 \cdot 0,0076 + 10,5 \cdot 0,0015 - \\ -10,8 \cdot 0,3705 - 2,5 \cdot 0,1008 = \underline{\underline{12,19 \frac{MJ}{kg}}} \quad (4.3.43)$$

Die Auswertung von Glg. (4.3.42) für die ZS-Probe bestätigt eine gute rechnerische Näherung des Heizwertes nach Boie [11] verglichen mit den Analysewert aus Tabelle 4.3-16.

Die Hauptelemente C, H, S und N bilden bei vollständiger Verbrennung, welche bei der Verbrennungsrechnung vorausgesetzt wird, die Endprodukte CO_2 , H_2O , SO_2 , NO_2 . Befinden sich nach der Verbrennung neben oder anstatt dieser gasförmigen Verbrennungsprodukte noch brennbare feste Stoffe oder Gase, wie z.B. CO, so liegt eine unvollständige Verbrennung vor. [11]

Aus der nun vorliegenden Elementaranalyse und unter Voraussetzung einer vollständigen Verbrennung, lässt sich der erforderliche Mindestsauerstoffbedarf ($O_{2,min}$) ermitteln:

$$O_{2,min} = 1,87 \cdot c + 5,6 \cdot h + 0,7 \cdot s - 0,7 \cdot o \quad (4.3.44)$$

$$O_{2,min,ZS} = 1,87 \cdot 0,36 + 5,6 \cdot 0,04 + 0,7 \cdot 0,002 - 0,7 \cdot 0,37 = \underline{\underline{0,64 \frac{Nm^3}{kg_{BST}}}} \quad (4.3.45)$$

Durch den nur zu 21% in der Luft enthaltenen Sauerstoff, bedarf es einer weiteren Berechnung, um schließlich die theoretisch erforderliche Luftmenge (L_{min}) ermitteln zu können. Die Mindestluftmenge entspricht dem Quotienten aus dem stöchiometrisch erforderlichen Sauerstoffbedarf und dem in der Luft enthaltenen Anteil an Sauerstoff in Prozent. Allgemein gültige Voraussetzung ist jene, dass in 1 Nm^3 Luft $0,21 \text{ Nm}^3$ Sauerstoff und $0,79 \text{ Nm}^3$ Stickstoff enthalten ist.

$$L_{min} = \frac{O_{2,min}}{0,21} \quad (4.3.46)$$

$$L_{\min_ZS} = \frac{O_{2_min_ZS}}{0,21} = \frac{0,64}{0,21} = \underline{\underline{3,05 \frac{Nm^3}{kg_{BST}}}} \quad (4.3.47)$$

Da in der praktischen Umsetzung des Verbrennungsprozesses nicht jedes brennbare Molekül eine Verbindung mit dem Sauerstoff findet, muss ein entsprechender, gegenüber der theoretisch notwendigen Luftmenge, Überschuss an Luft zugegeben werden, um dennoch eine vollständige Verbrennung zu erreichen. Dieser tatsächliche Luftbedarf, ergibt sich aus der Luftverhältniszahl (λ).

$$\lambda = \frac{L}{L_{\min}} \rightarrow L = \lambda \cdot L_{\min} \quad (4.3.48)$$

Dabei sollte der Luftüberschuss möglichst gering sein und kann entsprechend folgender Tabelle in erster Näherung angenommen werden.

Tabelle 4.3-17: Erfahrungswerte Luftüberschuss [11]

Feuerung	λ	Einheit
Wirbelschicht	1,3 – 1,5	[-]
Planrost, wurfbeschild	1,5 – 1,7	[-]
Treppenrost, Schürrost	1,3 – 1,5	[-]
Kohlenstaub/Trockenk.	1,3 – 1,4	[-]
Gasfeuerung	1,05 – 1,1	[-]

$$L_{ZS} = \lambda \cdot L_{\min_ZS} = 1,5 \cdot 3,05 = \underline{\underline{4,6 \frac{Nm^3}{kg_{BST}}}} \quad (4.3.49)$$

Um nun die wichtige Information der Brennstoffmenge pro Zeiteinheit zu erhalten, muss der am Arbeitspunkt der Wirbelschichtapparatur eingestellte Volumenstrom in Verhältnis mit dem tatsächlichen Luftbedarf gesetzt werden (Schüttdichte Pellets: $\rho_{\text{Schütt}}=650\text{kg/m}^3$).

$$\dot{m}_{BST_Masse_ZS_ (Reh)} = \frac{\dot{V}_{AP850_Norm_ (Reh)}}{L_{\min_ZS}} \cong \underline{\underline{0,15 \frac{kg}{h}}} \quad (4.3.50)$$

$$\dot{V}_{BST_Volumen_ZS_ (Re)} = V_{B_Reaktor_Masse_ZS_ (Reh)} \cdot \frac{1}{\rho_{\text{Schütt}_{ZS}}} \cong \underline{\underline{0,24 \frac{l}{h}}} \quad (4.3.51)$$

Damit kann nun eine erste Aussage zur erforderlichen Fördermenge der Brennstoffschnecke gemacht werden. Bei Verwendung von Holzpellets (HP) und analoger Verbrennungsrechnung, wäre eine Menge von 100g/h, nach Auswertung von Glg. (4.3.50), erforderlich und damit um rund 50% weniger Brennstoff als bei Verwendung der Zwiebelschalenpellets (ZP) nötig.

4.3.7 Schüttkegel Quarzsand

Die Berechnung des Schüttkegels ist für die Ausführung des Lochbodens relevant, um beim Öffnen der Flanschverbindung, respektive Entleeren der Apparatur, das Bettmaterial möglichst vollständig entnehmen zu können und nicht über den Rand des Lochbodens rieselt (vgl. Abbildung 4.3-10 und Abbildung 4.4-12).

Tabelle 4.3-19: Werte für Schüttkegel Quarzsand

Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Schütthöhe	$H_{Schüttung}$	90	[mm]
Schüttwinkel	$\alpha_{Schüttkegel}$	33	[°]
Innendurchmesser	d_{i_WS}	53,1	[mm]

Mit der Volumsformel für Kegeln sowie unter Anwendung einfacher Winkelfunktionen kann wie folgt eine Gleichung zur Berechnung des Schüttradius aufgestellt werden:

$$V_{Sand.Schüttung} = \frac{d_{i_WS}^2 \cdot \pi}{4} \cdot H_{Schüttung} = \frac{53,1^2 \cdot \pi}{4} \cdot 90 = \underline{199306 \text{ mm}^3} \quad (4.3.54)$$

$$V_{Kegel} = V_{Sand.Schüttung} = \frac{1}{3} \cdot r_K^2 \cdot \pi \cdot H_K \quad \text{mit} \quad H_K = r_K \cdot \tan(\alpha) \quad (4.3.55)$$

nach Umformung:

$$r_K = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V_{Sand.Schüttung}}{\pi \cdot \tan(\alpha)}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 199306}{\pi \cdot \tan(33)}} = \underline{66,4 \text{ mm}} \quad (4.3.56)$$

$$d_{Schüttkegel} = 2 \cdot r_K = 2 \cdot 66,4 = \underline{132,8 \text{ mm}} \quad (4.3.57)$$

Für den Lochboden wurde für die Ausführung ein Außendurchmesser von 230 mm gewählt. Dies hat den zusätzlichen Vorteil, dass die Handhabung beim Anheben und Wegnehmen der gesamten Lochplatte samt Schüttkegel entsprechend verbessert wird. Ebenso wurden an den entsprechenden Stellen Bolzen angebracht, um das Einrichten und Zentrieren des Lochbodens beim Zusammenbau wesentlich zu vereinfachen. Vergleiche dazu Abbildung 4.4-12.

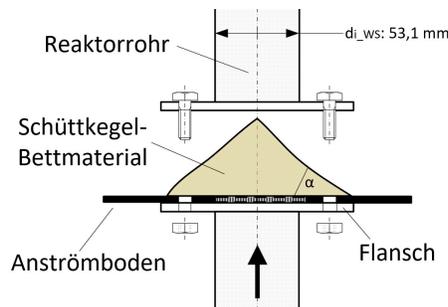


Abbildung 4.3-10: Schüttkegel Bettmaterial bei Öffnung der Flanschverbindung

4.4 Konstruktive Ausführung

Nachfolgende Bilder zeigen die konstruktive Umsetzung der Hauptbaugruppen auf Grundlage der finalen CAD-Zeichnungen bzw. Funktionsschemas.

4.4.1 Gesamtaufbau

Die nachfolgenden Bilder zeigen den Gesamtaufbau der Apparatur inklusive der Messbox zur Messdatenerfassung der an der Apparatur angebrachten Temperatur- bzw. Druckmessstellen. Ebenso ist die Positionierung des Schaltschranks und der Beschickungseinheit, bestehend aus Brennstoffbunker und Dosierschnecke mit Antriebsmotor (Brennstoffzuführsystem), gut erkennbar.



Abbildung 4.4-1: Gesamtaufbau mit Messbox Abbildung 4.4-2: Gesamtaufbau mit E-Schrank

Abbildung 4.4-3 und Abbildung 4.4-4 zeigen die gesamte Stahlkonstruktion ohne den Heizschalen sowie die konstruktive Lösung der seitlichen Brennstoffbeschickung im oberen Teil der Apparatur. Die in der Abbildung 4.4-3 ersichtlichen Auflageplatten dienen als stabile und sichere Standflächen der Heizschalen.

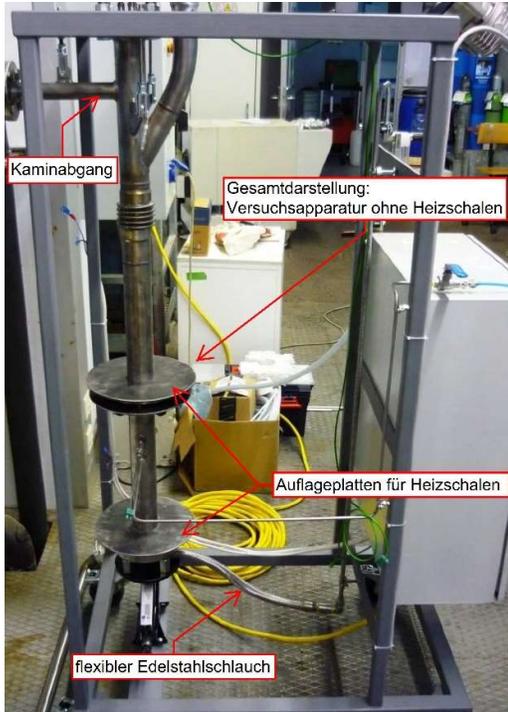


Abbildung 4.4-3: Gesamtaufbau - Seite

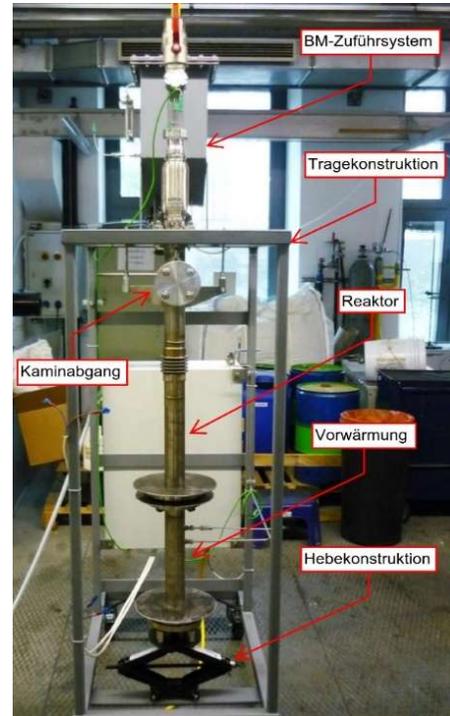


Abbildung 4.4-4: Gesamtaufbau - Front

Der Aufbau inklusive der Heizschalen und Isoliermaterial (Keramikkfaser) ist in Abbildung 4.4-5 dargestellt. Abbildung 4.4-6 zeigt die Vorwärmstrecke vor Eintritt in den unteren Zylinder (Vorwärmzylinder) inklusive der schon angebrachten Heizmanschette.

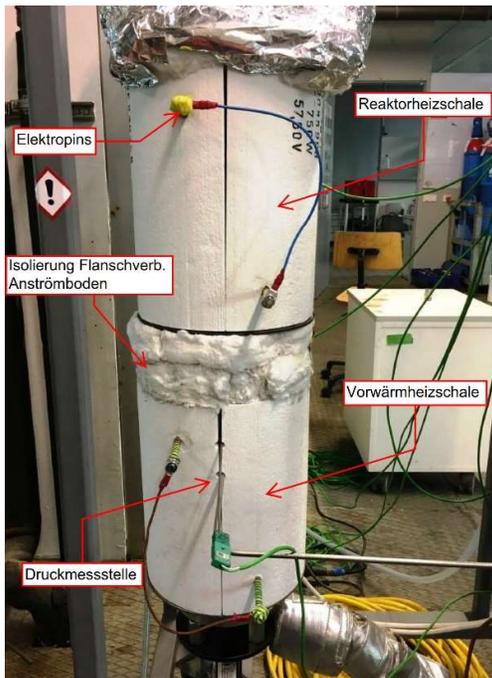


Abbildung 4.4-5: Aufbau mit Heizschalen



Abbildung 4.4-6: Aufbau Vorheizschlauch

4.4.2 Brennstoffzufuhr mit Speicherbunker

Die beiden nachfolgenden Bilder zeigen den Brennstoffbunker mit dem zusätzlich angebrachten Equipment (Rotameter, Kugelhähne), sowie weitere Details zur konstruktiven Ausführung der Beschickungseinheit.

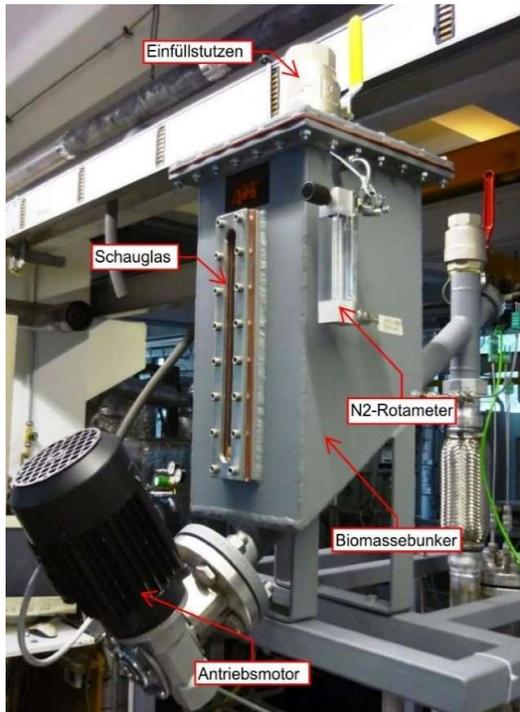


Abbildung 4.4-7: Biomassebunker

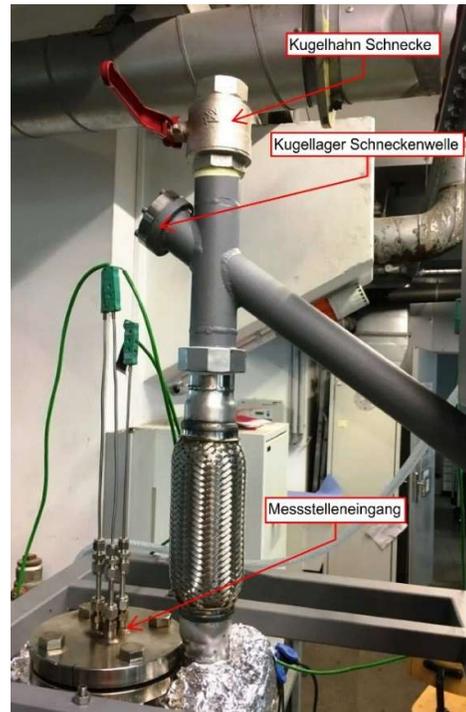


Abbildung 4.4-8: Biomassezufuhr

Die in Abbildung 4.4-10 gekennzeichneten Kompensatoren dienen der mechanischen Entkoppelung der Hauptbaugruppen. Dabei gleicht der Wellrohrkompensator die axiale Wärmeausdehnung des Reaktorrohres aus, um die mechanische Spannung an den Fixpunkten (Aufhängungen) möglichst gering zu halten bzw. vollständig auszugleichen. Der Kompensator mit Edelstahl-Außengeflecht fungiert als Entkoppelung des Brennstoffzufuhrsystems zum festverschweißten Zuführstutzen (vgl. Abbildung 4.4-9), welcher im Grunde die Verbindung zur Wirbelschichtapparatur darstellt. Vibrationen, verursacht durch die Förderschnecke, werden dadurch nicht oder nur in geringem Maße übertragen. Speziell im großtechnischen Anlagenbau ist es unumgänglich etwaige Ausgleichsfugen oder Bauteile zur Kompensation mechanisch bedingter Vibrationen und Bewegungen vorzusehen. Abbildung 4.4-11 zeigt die ausgebaute Dosierschnecke im Detail.



Abbildung 4.4-9: BM - Zuführstutzen

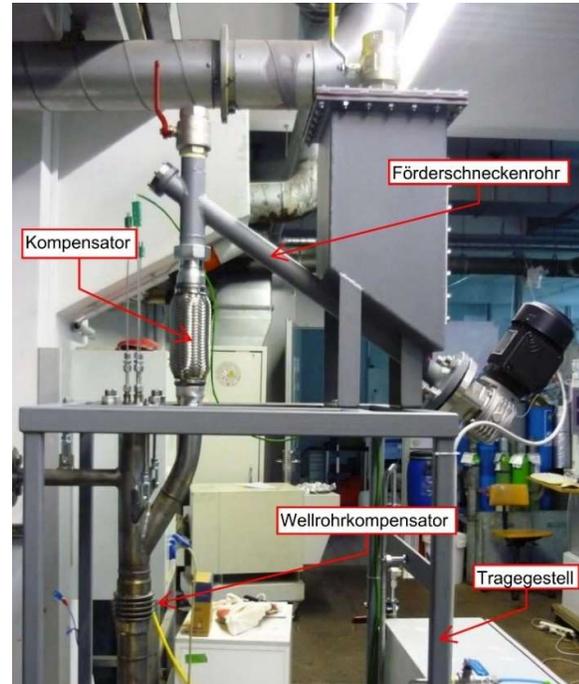


Abbildung 4.4-10: Gesamtaufbau - BM Zufuhr

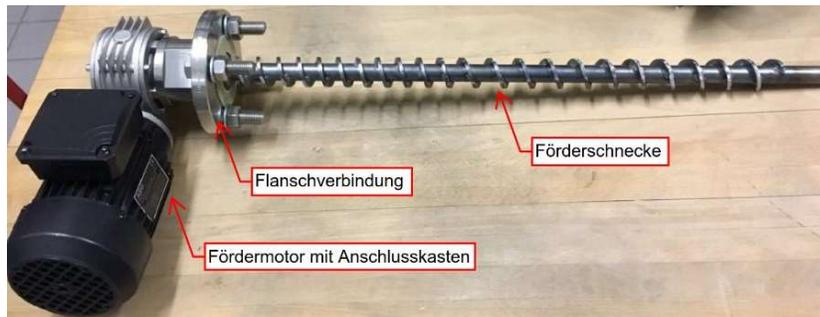


Abbildung 4.4-11: Förderschnecke mit Antriebsmotor

4.4.3 Entleerungsmöglichkeit und Anströmboden

Neben einigen alternativen Ansätzen zur Entleerung des Bettmaterials, wie dem Einschweißen eines schrägen Stutzens im Bereich des Lochbodens bzw. der Entleerung durch einen Sauger von oben, wurde die Entnahmemöglichkeit des Bettmaterials durch eine Flansch-Klemmkonstruktion mit entsprechenden Flanschdichtungen als die beste Lösung gesehen und realisiert. Dazu wird die Flanschverbindung beim Anströmboden geöffnet und der untere Teil der Apparatur (Vorwärmzylinder) mittels Axialheber abgesenkt. Der Lochboden mit dem darauf angehäuften Bettmaterial liegt somit frei und kann als Gesamtes entnommen werden (vgl. Abbildung 4.4-13).

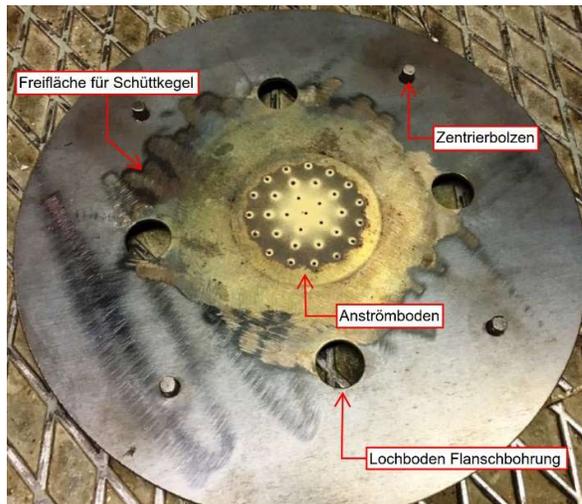


Abbildung 4.4-12: Anströmboden (Lochboden)

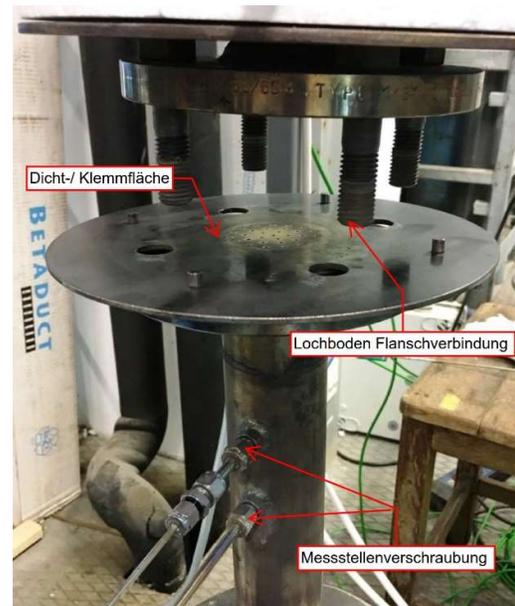


Abbildung 4.4-13: Entleerung Bettmaterial

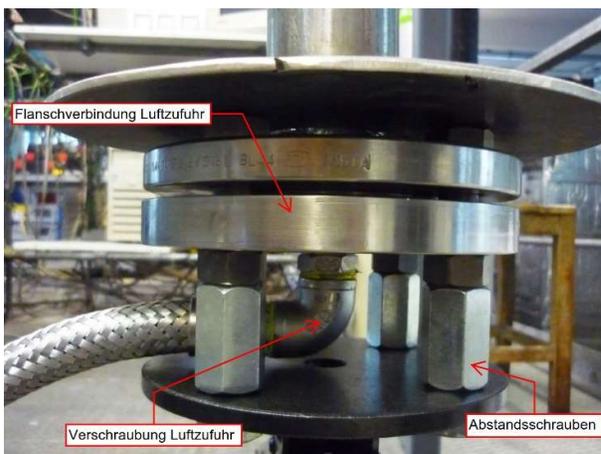


Abbildung 4.4-14: Untere Flanschverbindung bei Luftzufuhr

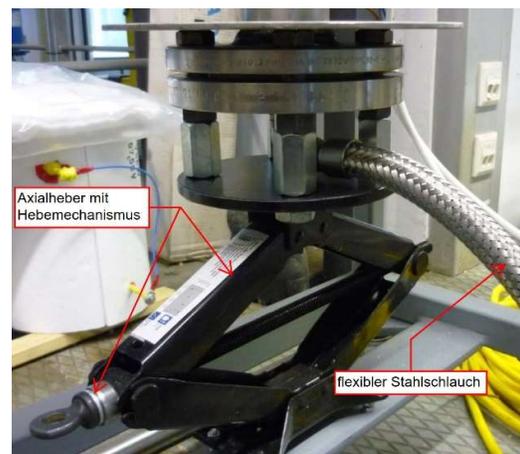


Abbildung 4.4-15: Hebekonstruktion

4.4.4 Messstellenausführung

Die Positionierung und Anordnung der Messstellen sowie Details zur Messstellenverschraubung (Dichtheit) werden in den nachfolgenden Bildern dargestellt.

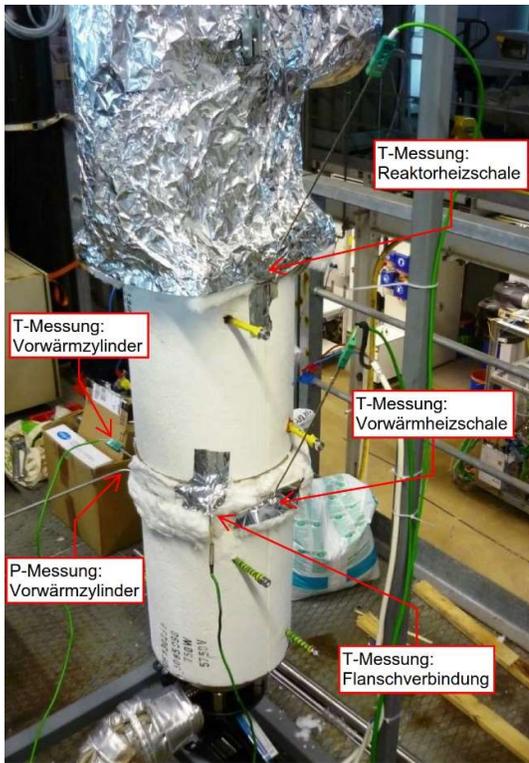


Abbildung 4.4-16: Messstellenanordnung

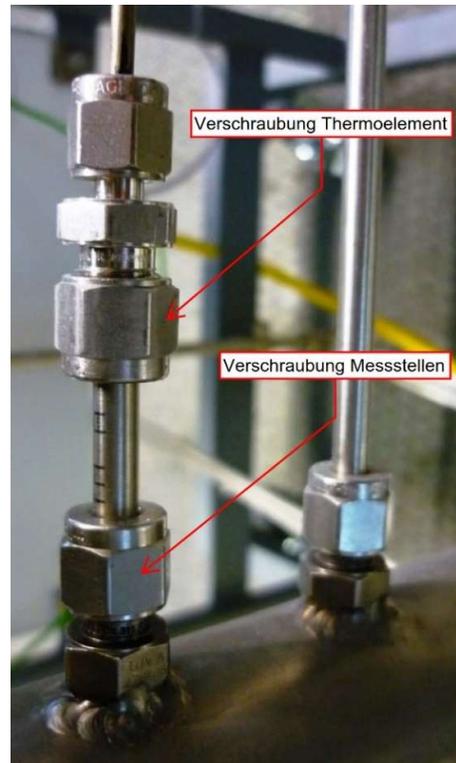


Abbildung 4.4-17: Messstellenverschraubung

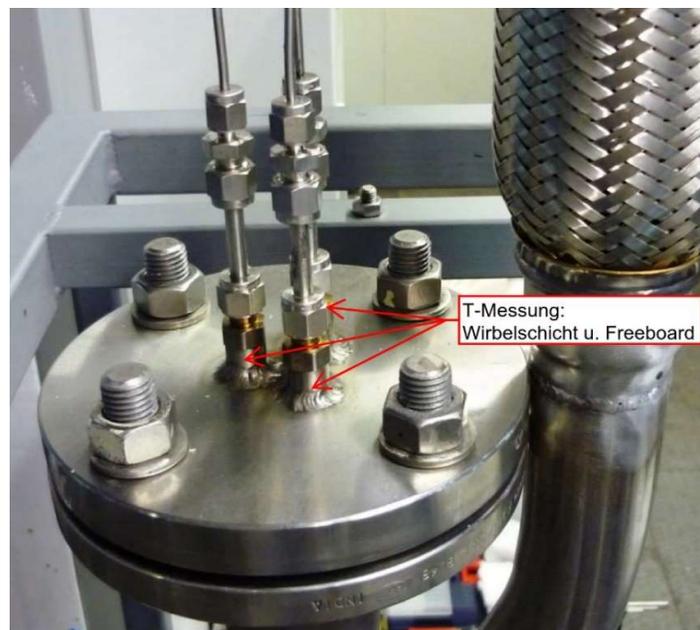


Abbildung 4.4-18: Messstellenanordnung Flansch oben

4.4.5 Apparatur-Stückliste

Eine Auflistung der eingesetzten Komponenten für den Stahlbau findet sich in Tabelle 4.4-1.

Tabelle 4.4-1: Auszug Stückliste - Apparatur

Stückliste Wirbelschichtapparatur				
<i>Apparatur</i>				
Pos.Nr.	Anzahl	Benennung	Spezifikation	Werkstoff
1	3	Edelstahlrohr DN50, nahtlos	EN ISO 1127 Ø60,3x3,6mm	1.4841
2	1	Edelstahlrohr DN25, nahtlos	EN ISO 1127 Ø33,7x2,6mm	1.4841
3	4	Flansch DN50, Typ 11	EN 1092-1 / 11 / B / DN50 / PN10-16	1.4404 (316L)
4	1	Flansch DN25, Typ 11	EN 1092-1 / 11 / B / DN25 / PN10-16	1.4301 (304)
5	2	Flansch DN50, Typ 05A	EN 1092-1 / 05 / B1 / DN50 / PN10-16	1.4404 (316L)
6	4	Flachdichtung MILAM PSS 200, IBC, DN50	DIN 2690-EN1514-1 / IBC / DN50 / PN10-40, 107x61mm	1.4401
7	1	Axial-Wellrohrkompensator, DN50	Abmessung lt. Herstellerangaben	1.4841
8	5	Gerade Einschraubverschraubung	6mm Rohrverschraubung, 1/4 Zoll ISO Außengewinde	1.4401 (316)
9	1	Edelstahlwellschlauch mit Geflecht	1/2 Zoll, 1/2 Zoll Gewindeanschluss, L=500mm	1.4301
10	1	Anströmboden, Lochplatte	Ø-Außen: 230mm, Loch-Ø: 31x1mm, Dicke 3mm	1.4841
11	12	Sechskantschraube M16x70mm	EN ISO 4032 - M16 x 60 (70)	2.4851
12	12	Sechskantmutter M16	EN ISO 4014 - M16	2.4851
13	24	Beilagscheibe M16	DIN EN ISO 7090	2.4851
14	1	Edelstahlrohr DN40, nahtlos, gebogen, 30°	EN ISO 1127 Ø48,3x3,2mm, 1 1/2 Zoll	1.4841
15	1	Edelstahl-Rohrkompensator (Zufuhrstützen zu Fördereinheit)	Abmessung lt. Herstellerangaben	1.4301 (316)

4.5 Equipmentauswahl

4.5.1 Hauptkomponenten

Die Auswahl des Equipments zum Betrieb und Aufbau der Apparatur wurde zum einen auf Grundlage der in Kapitel 4.3 vorangegangenen Auslegungsberechnungen und zum anderen auf Basis von ausschließlich konstruktiven Überlegungen hinsichtlich Realisierbarkeit vorgenommen. Dabei stellen die Auswahl der geeigneten Heizschalen (Abmessungen, Heizleistung, individuelle Anpassbarkeit, Material, Abstand der Heizspiralen zu Rohraußenwand) und Schwebekörper-Durchflussmesser (Messbereich, konstruktive Ausführung, Auslegungsparameter – Medium, Betriebsdruck) die wesentlichsten Bauteile und somit das Hauptequipment dar. Der Auslegungsdruck des Luft-Rotameters wurde mit 5 bar (= Vordruck bzw. Überdruck) gewählt, da das Druckluftnetz der TU Wien ein Druckniveau von 9 bar gewährleisten kann und dadurch eine konstante Durchflussmenge, auch bei etwaigen Druckschwankungen, sichergestellt werden kann. Die Festlegung der notwendigen Spezifikation und schließlich Auswahl und Bestellung der Komponenten sollte am ehest möglichen Zeitpunkt erfolgen, um etwaige Lieferzeiten kompensieren zu können.

4.5.2 Equipment-Stückliste

Nachfolgender Stücklistenauszug listet das verwendete Equipment und die entsprechenden Produktspezifikationen.

Tabelle 4.5-1: Auszug Stückliste - Equipment

Stückliste Wirbelschichtapparatur			
<i>Equipment</i>			
Anzahl	Benennung	Spezifikation	Werkstoff
1	Förderschnecke inkl. Rohr u. Wellenlager	300-500g/h Fördermenge	Normalstahl
1	Bunker inkl. Deckel, Schauglas	Füllvolumen ca. 10L, 215x215x370 (LxBxH)	Normalstahl
4	Fibrothal Standard Halbschalen	Außen-Ø: 250mm, Innen-Ø: 100mm, Länge 300mm Leistung: 0,75kW, Spannung: 57,5V	Ceramic Fiber
7	Thermoelement inkl. Verbindungsstecker (m/w) u. Kabel (1x Freeboard, 1x Windbox, 2x WS, 2x Heizschalen, 1x Flansch, 1x Bunker)	Fühler: Typ K (NiCrNi) 150-1000mm, Stecker Typ K (m/w), Kabel: 2-adrig, grün, tlw. geschirmt	Edelstahl (Fühler)
1	Kugelhahn 1/4 Zoll (Druckmessung)	1/4 Zoll Standard- Kugelhahn, 1000 WOG	1.4401 (316)
1	Kugelhahn 1/2 Zoll (Luftzufuhr)	1/2 Zoll Standard- Kugelhahn, DN15, PN40	Pressmessing
1	Kugelhahn 2 Zoll (Bunker)	2 Zoll Standard-Kugelhahn, DN50, PN25	Edelstahl
1	Kugelhahn 1 1/2 Zoll (Förderrohr)	1 1/2 Zoll Standard-Kugelhahn, DN40	Edelstahl
1	Isoliermaterial	Keramikfasermatte 1000x610x50mm	Keramikwolle
1	Flaschendruckminderer N2, 230/10 bar	$P_{ein}=230\text{bar (max.)}$, $P_{aus}=10\text{bar (max.)}$, G1/4" Anschluss	Messing
1	Druckminderer, Luft	Arbeitsdruck: 12bar (max.), Manometer Ø40mm, 3/8" Anschlüsse	Edelstahl
1	Schwebekörper Durchflussmesser inkl. Verschr., Luft	Messbereich: 6,2-53 NI/min, Druck=5barü, Anschlüsse G1/4", Ventil am Ausgang, PS=10bar, TS=100°C,	Messing, PVC, 1.4401
1	Schwebekörper Durchflussmesser inkl. Verschr., N2	Messbereich: 10-100 NI/h, Druck=5barü, Anschlüsse G1/4", Ventil am Ausgang, PS=10bar, TS=100°C,	Messing, PVC, 1.4402
1	Edelstahlrohr, nahtlos (Messsonde Druck)	Außen-Ø6x1mm, Länge individuell angepasst	1.4301
1	Edelstahlrohr, nahtlos (Luftzufuhr)	Außen-Ø12x1mm, Länge individuell angepasst	1.4301
1	Gerade Einschraubverschraubung (Druckmessung)	6mm Rohrverschraubung, 1/4 Zoll ISO Außengewinde	1.4401 (316)
5	Gerade Reduzierschraubung (FB, 2xWS, VW, Bunker)	6mm auf 3mm Rohrverschraubung, durchgebohrt	1.4401 (316)
1	Tragekonstruktion, Gestell, lackiert	Rechteckprofil: 40x40 / 30x30mm, Flachstahl: 40x5mm	Normalstahl
4	Rollen für Gestell, gummiert	Rollen-Ø = 100mm	Gummi, Edelstahl
1	Edelstahlrohr, nahtlos, DN25 (Kamin)	EN ISO 1127 Ø33,7x2mm	1.4301 (304)
1	Flansch DN25, Typ 11 (Kamin)	EN 1092-1 / 11 / B / DN25 / PN10-16	1.4301 (304)
1	Flachdichtung MILAM PSS 200, DN25	DIN 2690-EN1514-1 / IBC / DN25 / PN10-40 70x35mm	1.4401
1	PVC-Schlauch mit Gewebereinlage, Druckluft	Transparent, Innen-Ø: 10mm	PVC
1	Teflon Schlauch, Druckmessung	Transparent natur, Innen-Ø: 4mm, Außen-Ø: 6mm	PTFE
2	Auflagescheibe (Heizschalen)	Außen-Ø: 235mm, Dicke: 4mm	1.4301 (304)
1	Wagenheber inkl. Schrauben u. Abstandshalter, lackiert	Schrauben: M16, Abstandshalter: M16, Heber: 1t (max.), 90-370mm Hub	sh. Herstellerangaben
1	diverse Kleinteile zur Montage	-	-

4.6 Elektrische Installation und Ausführung

4.6.1 Funktionsschema und Schaltplan

Abbildung 4.6-1 und Abbildung 4.6-2 zeigen den schematischen Aufbau und die Verschaltung der elektrischen Komponenten zur Temperaturregelung der Heizschalen und Steuerung der Förderschnecke zur Brennstoffzufuhr.

Heizschalenregelung: Die mittels Thermoelement gemessene Temperatur wird entsprechend den vorkonfigurierten Einstellwerten des PID-Reglers berechnet und damit die Aufheizrate sowie Regelverhalten realisiert (vgl. Abbildung 4.6-1). Das damit definierte Schaltverhalten der mechanischen Schützkontakte steuert den jeweiligen Transformator, welcher in letzter Konsequenz die in Serie verschalteten Halbschalen betreibt. Details zu den Einstellwerten der PID-Regler werden in Kapitel 4.7.2 beschrieben.

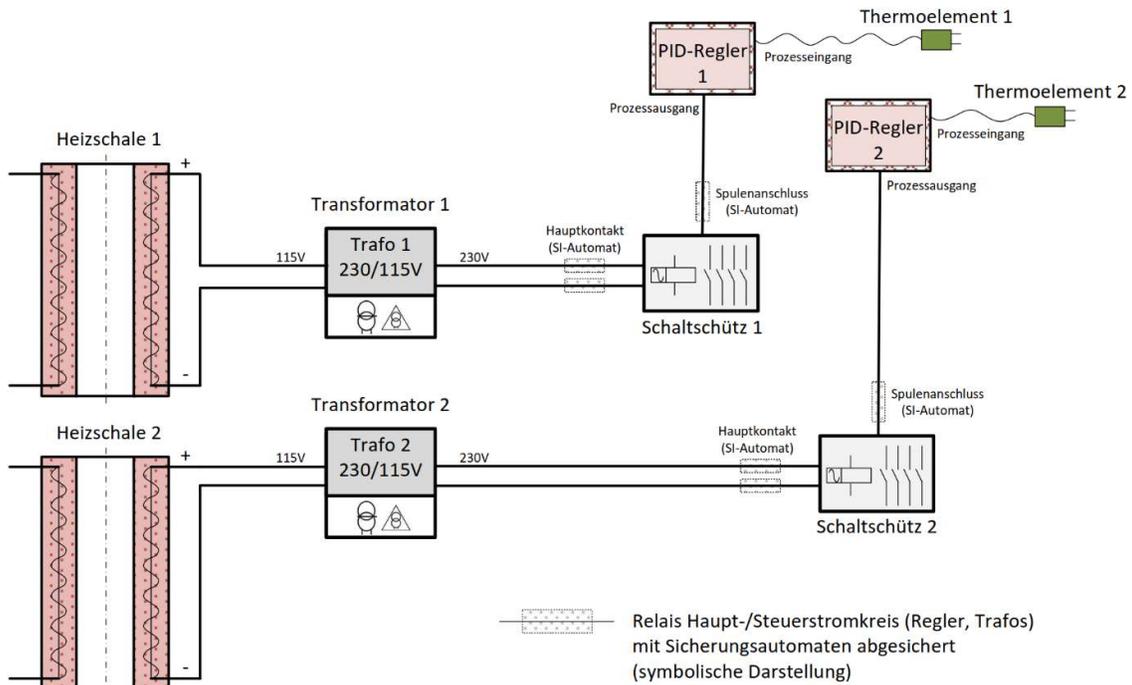


Abbildung 4.6-1: Schema - Heizschalenregelung

Förderschneckenregelung: Die Regelung und die damit einstellbare Fördermenge der Biomasseschnecke wird direkt über einen Frequenzumrichter realisiert. Inbetriebnahme und Einstellwerte werden in Kapitel 4.7.3 beschrieben und angegeben.

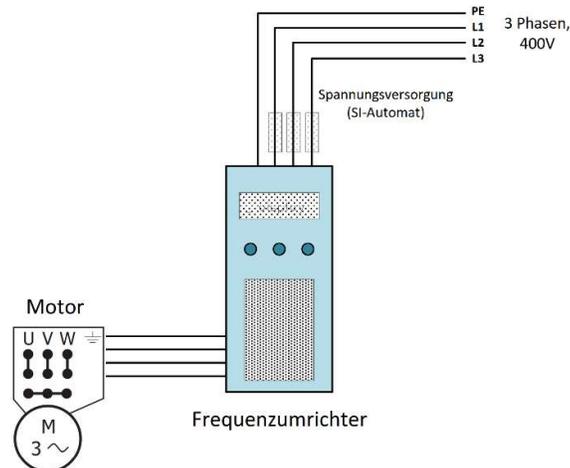


Abbildung 4.6-2: Schema - Förderschneckenregelung

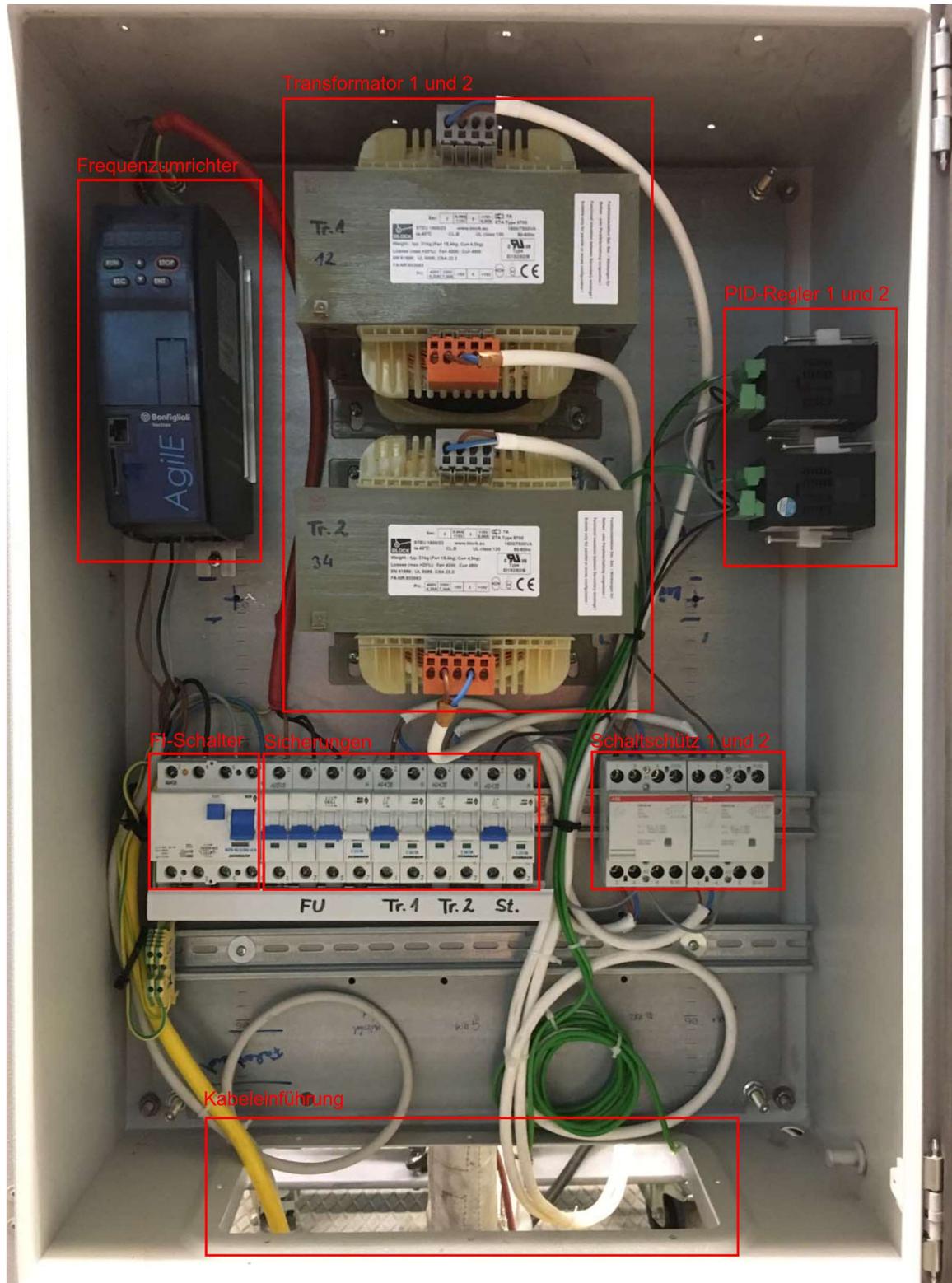


Abbildung 4.6-4: Elektroschrank - Aufbau

4.6.3 ElektrokompONENTEN-Stückliste

Tabelle 4.6-1 enthält die für den Betrieb notwendigen bzw. eingesetzten elektrischen Komponenten mit deren Spezifikationen und Stückzahlen.

Tabelle 4.6-1: Auszug Stückliste - ElektrokompONENTEN

Stückliste Wirbelschichtapparatur			
<i>ElektrokompONENTEN</i>			
Anzahl	Benennung	Spezifikation	Werkstoff
1	Antriebsmotor inkl. Getriebe u. Anschlussflansch	3-Phasen Asynchronmotor, 400V Stern, 0.18kW, 0.7A Flansch: DN32, PN16 (40)	Normalstahl Edelstahl (P250GH)
1	Frequenzumrichter (Antriebssteuerung Fördermotor)	Input: 400V, 50Hz, 3ph, 1.1A; Output: 0-50Hz, 3ph	sh. Herstellerangaben
2	Transformator	Eingangsspannung: 2x 230/400V, Ausgangsleistung: 2x 115V/AC, Leistung: 1600VA, Ausgangsstrom: 6.957mA	Fe, Cu
2	PID-Temperaturregler	Relais 5A, (L x B x H) 84x48x48 mm, 2 Relaisausgänge, SSR Steuerausgang, 230V/AC	sh. Herstellerangaben
2	Installationsschutz	4-polig, 230V AC/DC, 40-450Hz, 54mm Baubreite	sh. Herstellerangaben
1	FI-Schalter	40A, 4-polig, 30mA, vsf., Bauart G, Typ AC, 10kA Schaltvermögen	sh. Herstellerangaben
1	Sicherungsautomat (Frequenzumrichter)	Kennlinie C, 13A, 3-polig+N, 10kA	sh. Herstellerangaben
2	Sicherungsautomat (Transformator)	Kennlinie C, 16A, 1-polig+N, 10kA	sh. Herstellerangaben
1	Sicherungsautomat (PID-Regler)	Kennlinie C, 13A, 1-polig+N, 10kA	sh. Herstellerangaben
1	Elektroschrank, Standard inkl. Montageplatte	BHT: 500x700x250mm, IP66, eintürig, lackiert	Stahlblech
1	Versorgungskabel inkl. Starkstromkupplung	Starkstromkabel gelb: 5-adrig (br, sw, gr, bl, PE), 5x2,5mm ² CEE-Kupplung: 5-polig, 400V, 16A-6h, 3P+N+E, IP44, rotes Gehäuse	sh. Herstellerangaben
1	Kabel (interne Verdrahtung der Komponenten im Schrank)	einfache Litzenkabel (gr/sw/bl), Kabel weiß: 3-adrig (br, bl, PE) Kabel rot: 4-adrig (br, 2xsw, PE)	sh. Herstellerangaben
1	div. Kleinteile zur Montage	-	sh. Herstellerangaben

4.7 Inbetriebnahme

Die schrittweise Inbetriebsetzung der Apparatur erfolgte in der in diesem Kapitel angeführten Reihenfolge und stellt zeitlich betrachtet, als auch hinsichtlich gewünschter Funktionsweise, ebenso wie die Planung und konstruktive Ausführung, einen wesentlichen Teil dar.

4.7.1 Messdatenerfassung

Zur Aufzeichnung und Erfassung aller Messdaten wurde eine Messbox der TU Wien verwendet (vgl. Abbildung 4.7-1). Diese kann die Messdaten von bis zu 8 Thermoelementen und 3 Differenzdrucksensoren (Drucksensor Fa. Kalinsky Sensor Elektronik, Baureihe DS2 [44]) aufzeichnen und mittels Kommunikationsschnittstellen an den PC übertragen (vgl. Abbildung 4.7-2). Die Auswertung und Speicherung erfolgt direkt über eine ebenfalls an der TU Wien entwickelte Software („Mobile Measurement“). Die Messstellenanordnung, Ausführung sowie Funktion der einzelnen Messstellen wurden in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben (vgl.

KAPITEL 4 – PRAKTISCHER TEIL

Abbildung 4.2-1, Tabelle 4.2-1 und Kapitel 4.4.4). Abbildung 4.7-3 (oben) zeigt die Benutzeroberfläche der verwendeten Software. Darin kann jeder gemessene Wert in Echtzeit angezeigt, die Messstellen benannt sowie deren Messbereiche konfiguriert werden. Im unteren Abschnitt des Bildes wird die grafische Benutzeroberfläche der parallel zur Messung laufenden Datenaufzeichnung gezeigt. Beispielhaft ist im linken oberen Diagramm der Temperaturverlauf eines durchgeführten Versuches dargestellt (vgl. Abbildung 4.7-3, unten).



Abbildung 4.7-1: Messbox mit PC



Abbildung 4.7-2: Anschlüsse Messbox



Abbildung 4.7-3: Benutzeroberfläche "Mobile Measurement"-Software

4.7.2 Heizschalenregelung mittels PID-Regler

Die Funktionsweise und elektrische Ausführung der Heizschalenregelung mittels PID-Reglern wurde in Kapitel 4.6.1 erläutert. Die Einstellung der PID-Parameter erfolgte entsprechend dem gewünschten Aufheizverhalten der Heizschalen. Dafür wurden mehrere Aufheizzyklen ausgeführt und das Regelverhalten beobachtet, um anschließend die Stellglieder (P, I, D) anzupassen. Grundsätzlich wurde versucht, ein Regelverhalten zu realisieren, welches nur geringes bis kein Überschwingen des Temperaturstellwertes, zulässt. Dies hat den Vorteil, dass bei Erreichen des eingestellten Temperatur-Sollwertes ein stationärer Zustand, hinsichtlich der Temperaturverhältnisse in und um die Apparatur, herrscht. Ebenfalls wird damit sichergestellt, dass die Apparatur keinen schädigenden Temperaturgradienten ausgesetzt wird und ein gleichmäßiges, wenn auch langsames, Erwärmen stattfinden kann. Ein Einschwingen der Temperaturkurve auf den voreingestellten Sollwert ist damit nicht nötig.

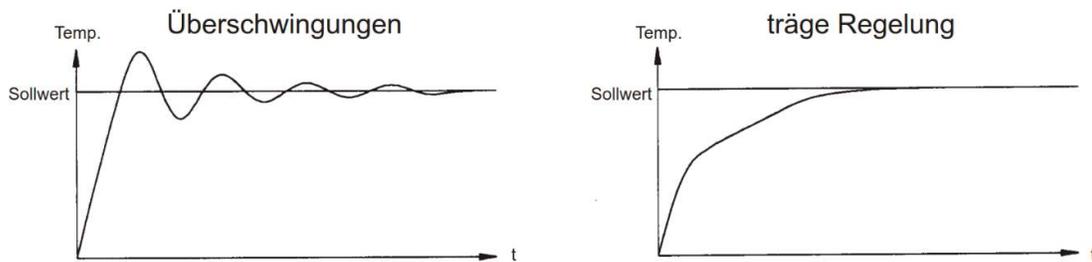


Abbildung 4.7-4: Vergleich Regelverhalten PID-Regler [53]

Durch den integrierten Selbst-Optimierungsprozess der eingesetzten Regler (vgl. Abbildung 4.7-5) konnten rasch die ersten Prozesswerte der Stellglieder ermittelt und entsprechend eigenen Vorstellungen angepasst werden. Die wichtigsten, konkret verwendeten, Regelparameter sind in Tabelle 4.7-1 zusammengefasst.

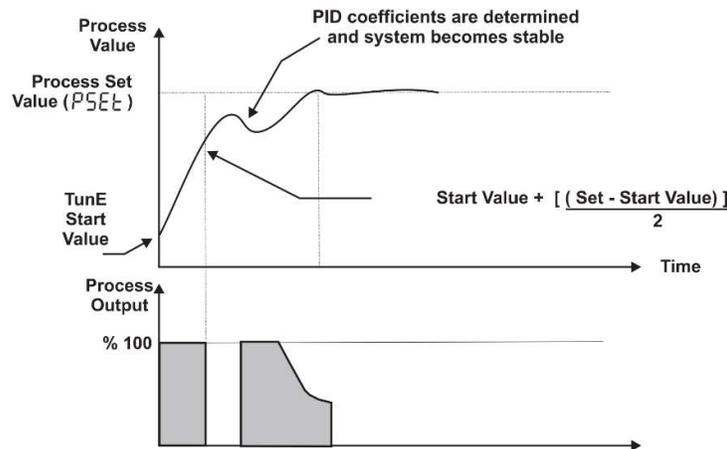


Abbildung 4.7-5: "Self-Tune" Funktion PID-Regler [55]

Tabelle 4.7-1: Einstellwerte PID-Regler

PID-Regler 1 (obere Heizschale – Reaktor)		
Parameter (Anzeige Menü)	Einstellwert	Einheit
Proportionalband (P_{rkn})	1,1	[%]
Integralzeit (t_{int})	145	[s]
Differentialzeit (t_{dEr})	36,2	[s]
Ausgangsleistung-Offset (t_{Con})	10	[s]
Prozesseingangstyp (P_{inS})	nCrn (Typ K)	-
Einstellwert Skala Min. ($PLoL$)	-40	[°C]
Einstellwert Skala Max. ($PuPL$)	+1100	[°C]
PID-Regler 2 (untere Heizschale – Vorwärmung)		
Parameter (Anzeige Menü)	Einstellwert	Einheit
Proportionalband (P_{rkn})	4,4	[%]
Integralzeit (t_{int})	374	[s]
Differentialzeit (t_{dEr})	93,5	[s]
Ausgangsleistung-Offset (t_{Con})	10	[s]
Prozesseingangstyp (P_{inS})	nCrn (Typ K)	-
Einstellwert Skala Min. ($PLoL$)	-40	[°C]
Einstellwert Skala Max. ($PuPL$)	+1100	[°C]

In Zusammenhang mit den angeführten Stellparametern ist die Angabe des Messbereichs der Thermoelemente, welcher vom eingesetzten Typ abhängig ist, von nicht unwesentlicher Bedeutung, da der PID-Regler auf Basis dieses Skalenbereichs die PID-Koeffizienten berechnet und somit direkte Auswirkung auf das Regelverhalten hat.

4.7.3 Kalibrierung der Brennstoffzuführung

Der elektrische Zusammenschluss des Antriebsmotors mit dem Frequenzumrichter zur Steuerung der Förderschnecke stellt den nächsten logischen Schritt der Inbetriebnahme dar (vgl. Kapitel 4.6.1). Die Konfiguration des Frequenzumrichters dient dazu, den Motor in Bezug auf die elektrische Leistungsversorgung nicht zu überlasten und des Weiteren einen Schutzmechanismus zu aktivieren, welcher zur Abschaltung im Falle eines ungewöhnlichen Betriebsverhaltens, verursacht durch Verkantung oder Verstopfung der Förderschnecke durch die Biomassepellets, führt.

Der ebenso netzwerkfähige Frequenzumrichter wurde im Zuge dieser Arbeit vorerst für die manuelle Steuerung konfiguriert. Eine Einbindung in ein Netzwerk würde eine Fernsteuerung ermöglichen. Die Spezifikation des Frequenzumrichters als auch des Antriebsmotors finden sich in Tabelle 4.6-1. Eine genaue Typenbezeichnung dieser und aller weiteren Komponenten wird in der Gesamtstückliste im Anhang B – Gesamtstückliste Versuchsausrüstung angegeben.

Tabelle 4.7-2 fasst die Einstellwerte des Frequenzumrichters zusammen, welche zur Erst-Konfiguration und im späteren für die Versuchsdurchführung definiert wurden.

Tabelle 4.7-2: Einstellwerte Antriebsmotor

Frequenzumrichter - Motorsteuerung		
Parameter (Anzeige Menü)	Einstellwert	Einheit
Regelungsverhalten (ctrl)	UF (Asynchronmotor)	-
Nennleistung (P_{out})	0,18	[kW]
Nennspannung (volt)	400	[V]
Frequenz (FrEq)	50,00	[Hz]
Motornennstrom (AMPErE)	0,7	[A]
Drehzahl (SPEED)	1330	[min ⁻¹]
Cosinus phi (coSPh)	0,7	[-]

Durch direktes Einstellen der Antriebsfrequenz am Frequenzumrichter werden unterschiedliche Fördermengen erreicht, welche in die Apparatur transportiert werden. Für jeden Brennstoff muss daher eine Neukalibrierung vorgenommen werden. In dieser Arbeit wurde die Kalibrierung für Holz- und Zwiebschalenpellets durchgeführt. Trotz der sehr ähnlichen Abmessungen ($D=6\text{mm}$, $L=3$ bis 40mm) und Gewichtsverhältnisse (vgl. Abbildung 4.7-8) verhielten sich die beiden Pelletsorten unterschiedlich hinsichtlich Fördermenge. Für die Kalibrierung wurde je Versuch exakt die gleiche Menge an Pellets in den Bunker vorgelegt, um anfangs den gleichen Gewichtsdruck der Pellets auf die Förderschnecke sicherzustellen. Anschließend wurde die Schnecke für jede Versuchsfrequenz mindestens zwei Mal für jeweils 15 Minuten betrieben. Damit konnte ein Vergleich zwischen den Holz- und Zwiebschalenpellets bei jeweils unterschiedlicher Frequenz angestellt werden. Nachfolgendes Diagramm zeigt dies in grafischer Form.

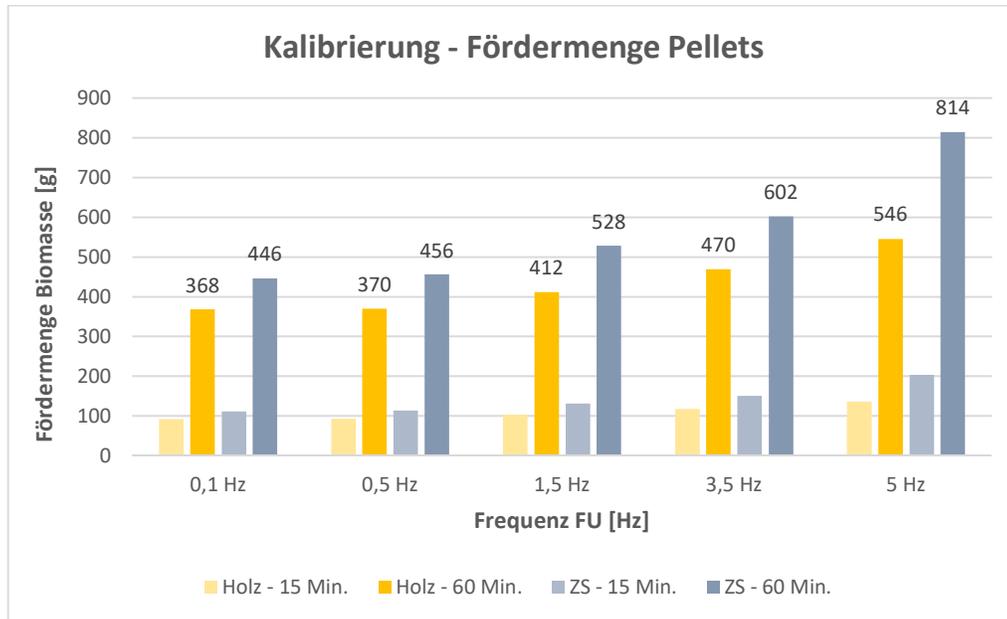


Abbildung 4.7-6: Kalibrierung - Brennstofffördermenge

Die in Abbildung 4.7-7 dargestellten Kalibrierkurven zeigen im Detail, wie sich die beiden Pelletssorten (HP, ZP) hinsichtlich der Fördermengen pro Zeiteinheit verhalten bzw. unterscheiden. Die dabei eingestellte Förderfrequenz am Frequenzumrichter (0,5 Hz) entspricht jener, welche auch bei den Versuchen zur Anwendung kam.

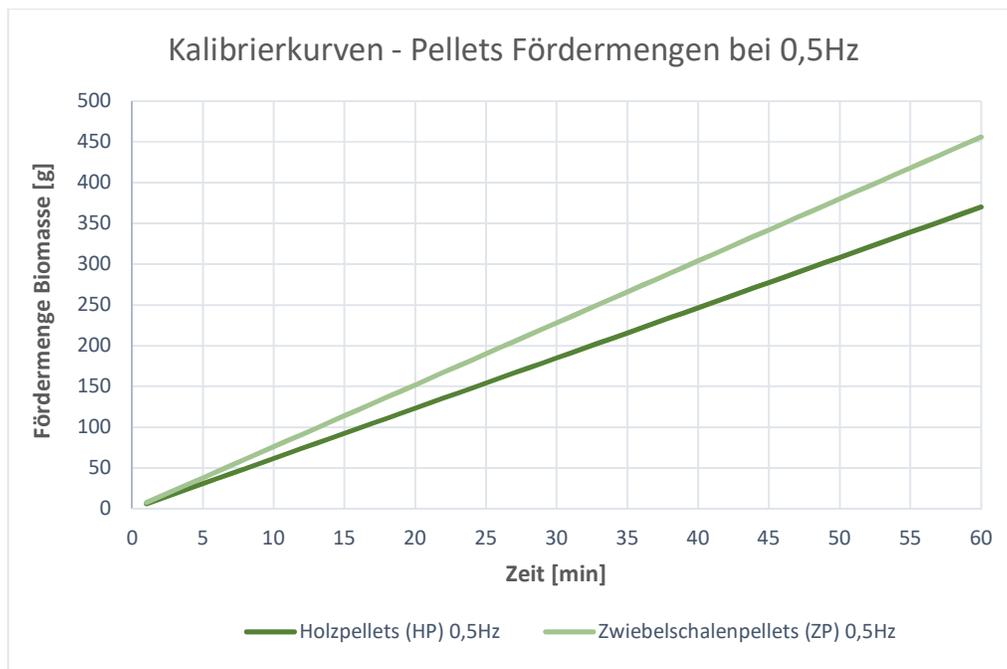


Abbildung 4.7-7: Kalibrierkurve FU bei 0,5Hz

Anhand der Kalibrierungsversuche ist zu erkennen, dass trotz der nahezu identer Abmessungen die Fördermenge der Zwiebelschalenpellets stets über jener der Holzpellets liegt. Die geringfügigen Unterscheidungen bezüglich Dichte und Oberflächenbeschaffenheit kommen hier zum Ausdruck. Die eingesetzten Zwiebelschalenpellets wiesen eine matte und relativ raue Oberfläche, im Vergleich zu der sehr glatten und glänzenden Oberfläche der Holzpellets, auf. Ein Kalibrierungsversuch mit Reisschalenpellets musste nach kurzer Zeit abgebrochen werden, da es zum Stillstand der Förderschnecke aufgrund von Verkantung kam. Die deutlich festere Zusammensetzung und folglich härteren Pellets mit einem hinzukommend größeren Durchmesser von 8mm, sind für diese Apparatur respektive Förderschnecke nicht geeignet und sollte nur nach sorgfältig durchgeführten Kalibrierungsversuchen eingesetzt werden.



Abbildung 4.7-8: Vergleich Holz- und Zwiebelschalenpellets

4.7.4 Bereitstellung und Vorbereitung des Bettmaterials

Das für die Erstversuche verwendete Bettmaterial muss entsprechend der im Auslegungsprozess vorgenommenen Auswahl, bezogen auf Partikelgröße und Material, vor- und aufbereitet werden. In dieser Arbeit wurde ausschließlich Quarzsand für die Versuchsdurchführung verwendet, mit der Begründung, für die Erstversuche ein möglichst unkritisches und in dessen Verhalten weitestgehend bekanntes Bettmaterial einzusetzen. Wie auch schon im Kapitel zur Auslegung der Apparatur als auch in den nachfolgenden Kapiteln näher beschriebenen Versuchsdurchführungen, wurde eine mittlere Partikelgröße von 350 μ m bzw. 450 μ m verwendet. Einfluss der Partikeleigenschaften, Klassifikation nach Geldart respektive Einteilung des Schüttgutes hinsichtlich dessen Fluidisierbarkeit wurde schon theoretisch in Kapitel 3.5.4 bzw. praktisch in Kapitel 4.3.1 beschrieben und vorgenommen.

KAPITEL 4 – PRAKTISCHER TEIL

Der zur Verfügung gestellte Quarzsand (Körnung 0,3 – 0,8mm) musste entsprechend der gewünschten Korngröße ausgesiebt werden (Siebdauer jeweils 20 Minuten). Die Siebung erfolgte mit Hilfe eines Siebturms, ausgestattet mit den entsprechenden Maschenweiten der Siebe (vgl. Abbildung 4.7-9). Für die in dieser Arbeit durchgeführten Versuche wurden die Quarzsand-Fractionen zwischen den Sieben mit 500 μ m und 400 μ m bzw. 400 μ m und 315 μ m verwendet.



Abbildung 4.7-9: Siebturm

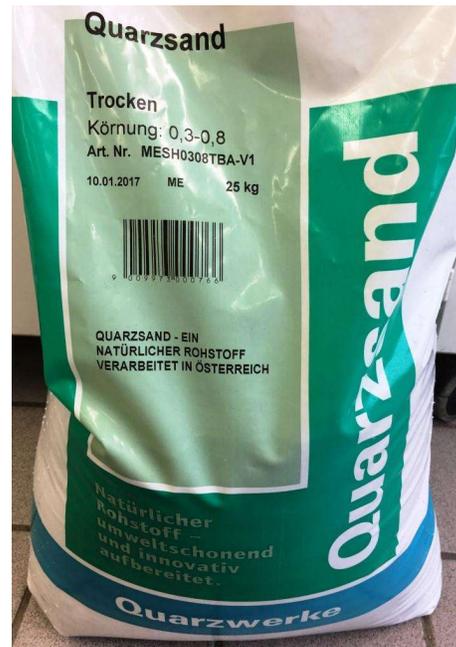


Abbildung 4.7-10: Quarzsand im Anlieferungszustand [39]

Ergänzend zeigen Abbildung 4.7-11 bis Abbildung 4.7-13 die Ergebnisse einer vorgenommenen Siebanalyse des Quarzsandes im Auslieferungszustand (Körnung 0,3 – 0,8mm, vgl. Abbildung 4.7-10) und widerspiegelt die Partikelgrößenverteilung des Schüttgutes. Im Weiteren wird hier nicht näher auf die Analyseergebnisse eingegangen, dennoch geben die gezeigten Diagramme Aufschluss über die in der mechanischen Verfahrenstechnik relevanten Kennwerte hinsichtlich Teilchengrößenanalysen. Auswertungstabellen der Siebanalyse sind im Anhang E – Siebturmanalyse zu finden.

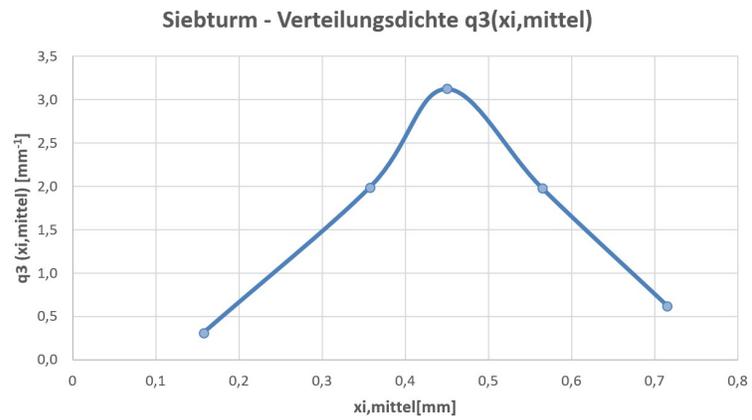


Abbildung 4.7-11: Teilchengrößenanalyse - Verteilungsdichte

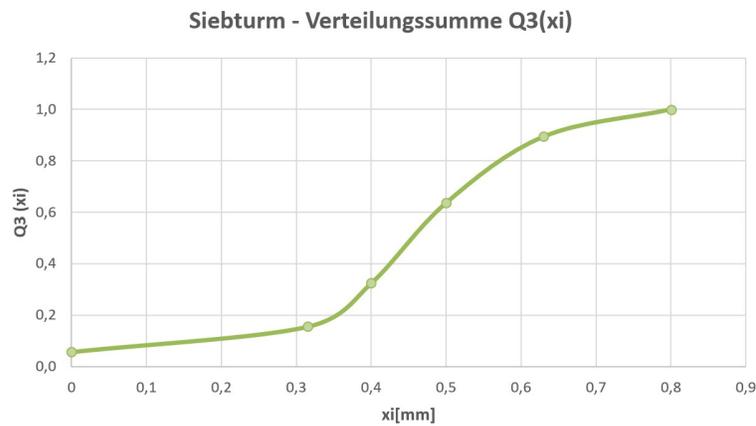


Abbildung 4.7-12: Teilchengrößenanalyse - Verteilungssumme

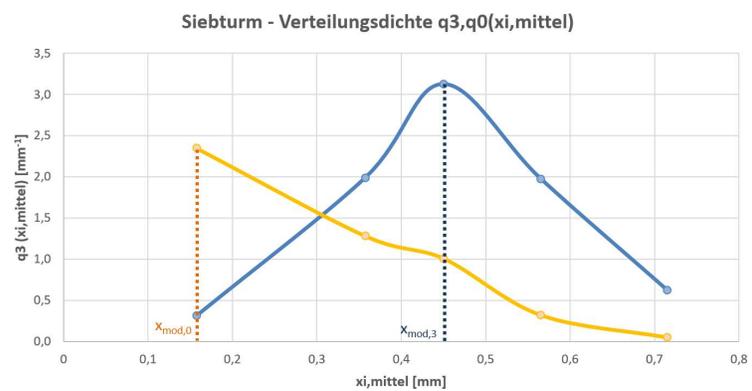


Abbildung 4.7-13: Teilchengrößenanalyse - Verteilungsdichte, Anzahlverteilung

4.7.5 Druckprüfung

Um die Kalt-Inbetriebnahme der Apparatur abzuschließen, wurde eine Druckprobe mit Luft durchgeführt, um etwaige Leckagen und undichte Verschraubungen, unter Verwendung eines Leckagesuchsprays, erkennen und entsprechend nachzubessern zu können. Zu diesem Zweck muss das System geschlossen werden, was im konkreten Fall durch Montage eines Blindflansches inklusive Flachdichtung am Anschlussflansch des Kaminabganges realisiert wurde. Des Weiteren sind alle Kugelhähne vollständig zu schließen. Die Druck- bzw. Dichtheitsprüfung wurde über den standardmäßigen Luftanschluss, welcher ebenso zur Fluidisierung genützt wird, ausgeführt. Die hier eigens definierte Voraussetzung für eine erfolgreiche Druckprobe ist das Halten des Prüfdruckes (3 bar) über eine Zeitspanne von mindestens 10 Minuten. Durch mehrfaches Nachziehen undichter Verbindungen sowie zusätzliches Abdichten durch ein geeignetes Teflon-Abdichtband konnte die Druckprüfung erfolgreich abgeschlossen werden.

4.8 Erstversuche

Der Inbetriebnahme folgend können die Erstversuche durchgeführt werden und entsprechende Vergleiche zwischen den tatsächlich gemessenen und den zu erwartenden Werten, basierend auf den Berechnungen, angestellt werden. Dazu wurden zuerst Druckverlustmessungen des Lochbodens und der Schüttung des Bettmaterials vorgenommen. Mit den gewonnenen, ersten, Erkenntnissen bzw. Erfahrungen mit der Apparatur, wurden anschließend Versuche mit Brennstoffzufuhr absolviert, die daraus erzeugten Aschen ausgesiebt und dessen Schmelzverhalten untersucht und verglichen.

4.8.1 Druckverlustmessung

Die Druckverlustkurven des Lochbodens wurden bei unterschiedlichen Temperaturen aufgenommen und als Kurven dargestellt. Dabei ist gut erkennbar, dass der Druckverlust bei höheren Temperaturen steigt und jeweils über der vorangegangenen Kurve bei niedrigerer Temperatur liegt. Dieses zu erwartende Ergebnis erschließt sich aus der Tatsache, dass bei höherer Temperatur, durch die expandierende Luft, die Strömungsgeschwindigkeit in den Löchern des Lochbodens steigt und sich der Druckverlust infolge erhöht. Wäre hier festzustellen, dass eine Messkurve mit höherer unter jener mit niedrigerer Temperatur liegt, so deutet dies auf eine Undichtigkeit aufgrund thermischer Ausdehnung im Bereich der Dichtflächen der Flanschverbindungen hin. Ein Nachziehen der Schraubverbindungen wäre somit notwendig.

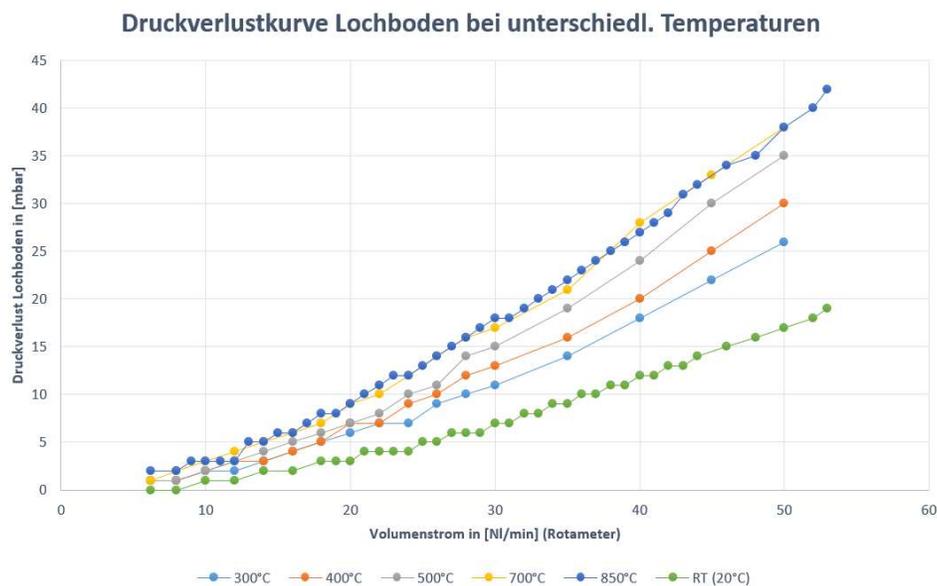


Abbildung 4.8-1: Druckverlustkurve Lochboden bei unterschiedlichen Temperaturen

Im nächsten Schritt wurde das Bettmaterial in die Apparatur gefüllt und sowohl für Raumtemperatur (vgl. Abbildung 4.8-2) als auch für die geplante Betriebstemperatur von 850°C (vgl. Abbildung 4.8-4) die Druckverlustkurven von Bettmaterial und Lochboden aufgenommen. Die Differenz der Messkurven von Lochboden inklusive Bettmaterial zum Lochboden alleine, ergibt den Druckabfall in der Wirbelschicht (siehe Abbildung 4.8-3). Die Füllmenge betrug dabei 300g, was einer Schütthöhe von knapp 10 cm entspricht (vgl. Kapitel 4.3.4).

Druckverlustmessung: 350µm, RT

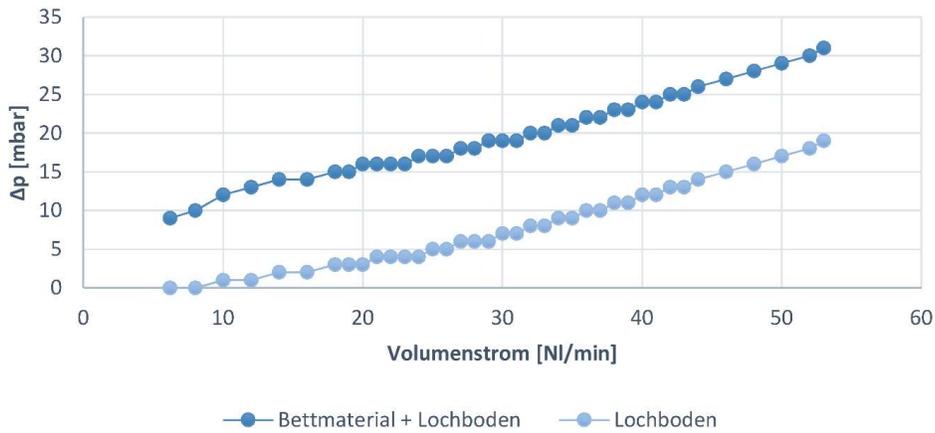


Abbildung 4.8-2: Druckverlustkurven - 350µm, RT

$$\Delta p_{\text{Wirbelschicht}} = \Delta p_{\text{Bettmaterial+Lochboden}} - \Delta p_{\text{Lochboden}}$$

Druckverlust: Wirbelschicht, 350µm, RT

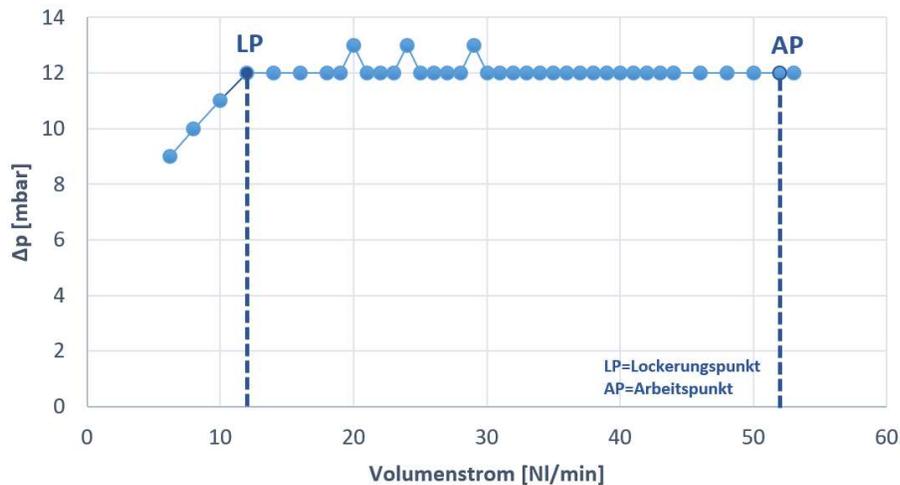


Abbildung 4.8-3: Druckverlustverlauf - 350µm, Wirbelschicht bei RT

Der Verlauf der Wirbelschichtdruckverlustkurve ist jenen aus der Theorie sehr ähnlich. Der scharfe Knick, welcher den Festbett- und Wirbelschichtbereich voneinander unterscheiden, widerspiegelt die enge Korngrößenverteilung der verwendeten gesiebten Quarzsand-Fraktion.

Ein Vergleich der berechneten zu gemessenen Volumenströme findet sich in Tabelle 4.8-1. Dabei zeigt der Wert nach Reh die größere Differenz gegenüber dem tatsächlichen Volumenstrom am Lockerungspunkt mit einer Abweichung nach oben hin von rund 3 NI/min.

Tabelle 4.8-1: Vergleich - Messung zu Berechnung, 350µm, RT

	Messung	nach GRACE	nach REH	Einheit
\dot{V}_{LP20_Norm}	12	10,4	14,8	[NI/min]

Mit gleicher Vorgehensweise und gleicher Menge an Bettmaterial (300g) wurden die Druckverlustkurven für 850°C aufgenommen und in Diagrammform gebracht.

Druckverlustmessung: 350µm, 850°C

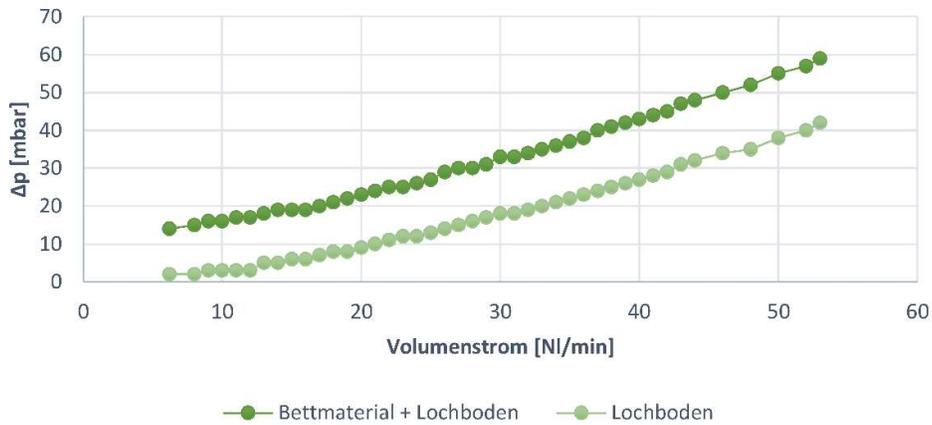


Abbildung 4.8-4: Druckverlustkurven - 350µm, 850°C

Druckverlust: Wirbelschicht, 350µm, 850°C

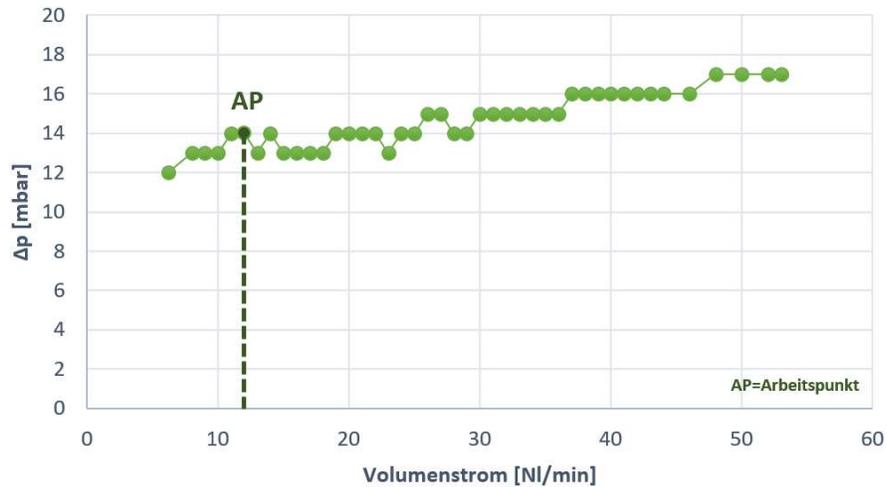


Abbildung 4.8-5: Druckverlustverlauf – 350µm, Wirbelschicht bei 850°C

Die Druckverlustmessung ergibt eine gute Näherung zu den Berechnungswerten (vgl. Tabelle 4.8-2, darin ist WS=Wirbelschicht, LB=Lochboden). Anhand von Abbildung 4.8-5 und Abbildung 4.8-6 kann eindeutig gezeigt werden, dass der gewählte Arbeitspunkt im Bereich der Wirbelschicht liegt. Die leicht steigende Tendenz des Druckverlustes, könnte aufgrund von pulsierenden Verhältnissen in der Wirbelschicht zurückzuführen sein.

Tabelle 4.8-2: Vergleich - Messung zu Berechnung, 350µm, 850°C

	Messung	nach GRACE	nach REH	Einheit
$\Delta P_{AP850_Norm_WS+LB}$	17	15	15	[mbar]
$\Delta P_{AP850_Norm_LB}$	3	2	2	[mbar]
$\Delta P_{AP850_Norm_WS}$	14	13	13	[mbar]

Nachfolgendes Diagramm zeigt den gemessenen Volumenstrom-Bereich, eingetragen in einem Druckverlust/Volumenstrom-Diagramm der Wirbelschicht. Eine Messung des Lockerungspunktes war nicht möglich, da die Messskala des eingesetzten Rotameters erst bei 6,2 NI/min beginnt. Der berechnete Wert für den Lockerungspunkt wurde zusätzlich in Abbildung 4.8-6 eingetragen und die mögliche Druckverlustkurve skizziert.

Druckverlust/Volumenstrom-Diagramm

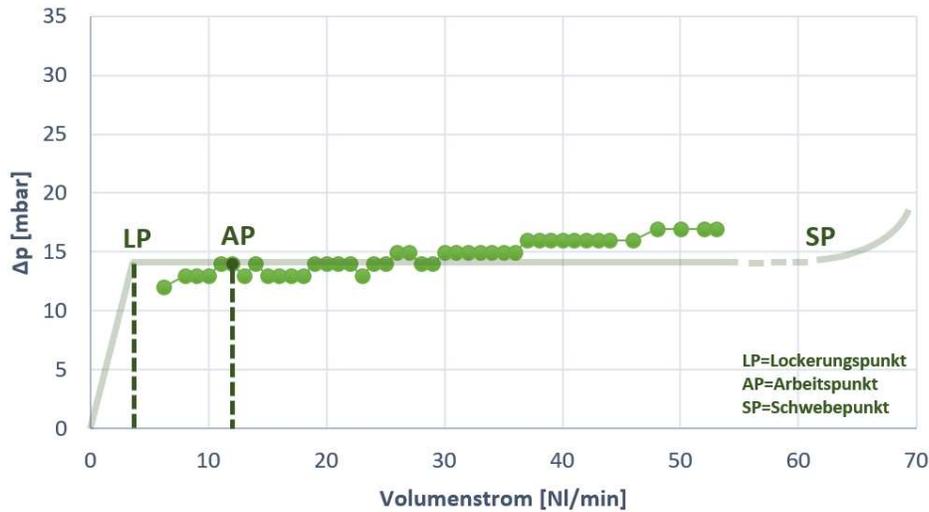


Abbildung 4.8-6: Druckverlust/Volumenstrom-Diagramm, 350µm, 850°C

Das angestrebte Druckverlustverhältnis am Arbeitspunkt des Lochbodens zur Wirbelschicht von 15%, ergibt sich aus den gemessenen Werten zu:

$$\frac{\Delta P_{D_Messung}}{\Delta P_{WS_Messung}} = \frac{3}{14} = \underline{\underline{0,21 \rightarrow 21\%}} \quad (4.8.1)$$

Aufgrund der ersten, aussagekräftigen, Werte zu den tatsächlichen Fördermengen der Biomasseschnecke im Zuge der Inbetriebnahme (vgl. Kapitel 4.7.3), wurden die Druckverlustmessungen ebenso für Quarzsand mit Körnung $450\mu\text{m}$ durchgeführt. Diese Maßnahme wurde gewählt, um eine Annäherung an die höhere Fördermenge, als der vorgegebenen bzw. erwarteten Menge, zu erreichen. Die Verwendung des etwas größeren Bettmaterials erhöht dementsprechend den Luft-Volumenstrom respektive die mögliche Verbrennungsmenge. Auf Grundlage der Druckverlustmessungen wurde der Arbeitspunkt zusätzlich auf die 12-fache Lockerungsgeschwindigkeit erhöht. Dem entspricht ein Volumenstrom von 22 NI/min . Ein noch höherer Volumenstrom bzw. noch gröberes Bettmaterial wurde vorerst nicht gewählt. Mit den eben genannten Einstellungen wurden später die Erstversuche zur Aschegewinnung durchgeführt. Ein noch größerer Bettmaterialdurchmesser könnte sehr leicht zu Verlegungen einzelner Bohrungen im Lochboden führen, da sich die Partikelkorngröße dem Lochdurchmesser sehr annähern würde. Eine Modifikation des Lochbodens wurde zu diesem Zeitpunkt nicht in Betracht gezogen. Es soll darauf hingewiesen werden, dass es sich hierbei um die ersten Versuche an der Apparatur handelt und dementsprechend keine Erfahrungswerte vorliegen. Die Wahl der idealen Einstellwerte und Betriebspunkte kann nur schrittweise erfolgen und muss für weiterführende Arbeiten an der Apparatur, entsprechend der verwendeten Biomasse bzw. dem Bettmaterial, neu bewertet werden und gegebenenfalls Anpassungen am Lochboden und/oder Zufuhrsystem vorgenommen werden. Bezüglich der tatsächlichen Verbrennungsverhältnisse bei den Versuchen wird in Kapitel 0 näher eingegangen. Zu diesem Zweck wurde temporär ein Equipment zur Abgasmessung aufgebaut. Die Druckverlustkurven für die Partikelkörnung von $d_p=450\mu\text{m}$ und einer Füllmenge von 300g ergibt folgende Messergebnisse.

Druckverlustmessung: $450\mu\text{m}$, RT

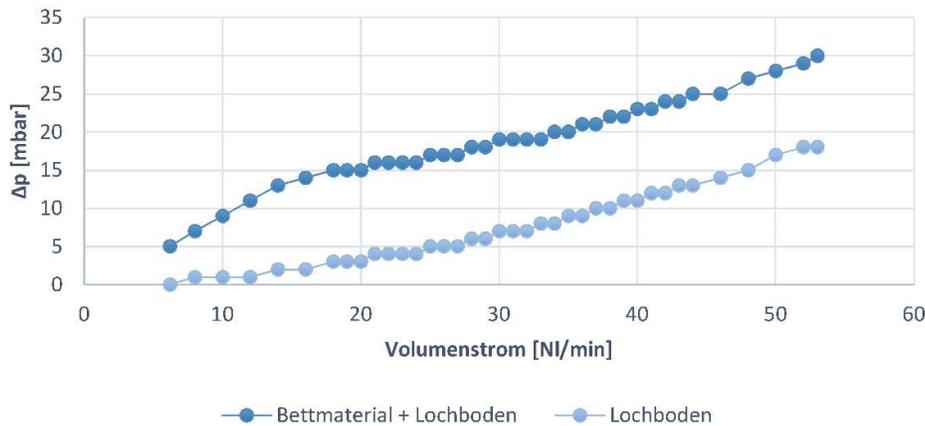


Abbildung 4.8-7: Druckverlustkurven - $450\mu\text{m}$, RT

Druckverlust: Wirbelschicht, 450µm, RT

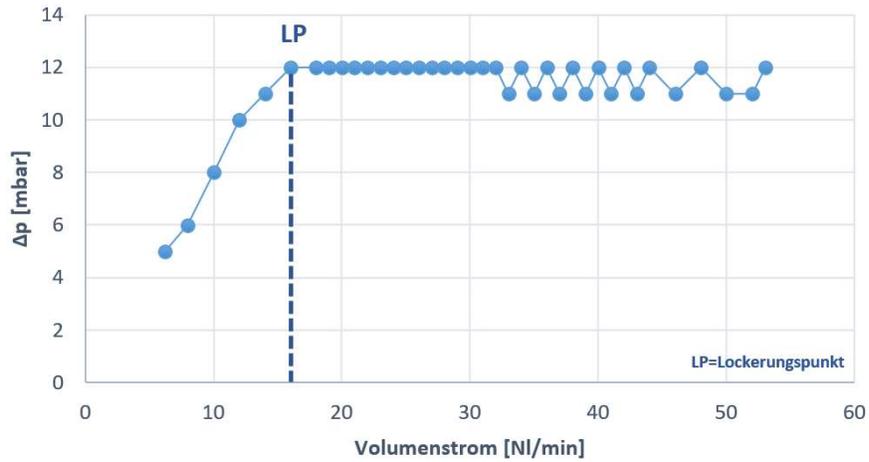


Abbildung 4.8-8: Druckverlustverlauf - 450µm, Wirbelschicht bei RT

An den Kurvenverläufen lässt sich ebenfalls der Übergang von Festbett- in Wirbelschichtbereich gut feststellen, wenn auch nicht ganz linear wie in Abbildung 4.8-3 für 350µm zu sehen. Der sprunghafte Verlauf ab ca. 32 NI/min lässt sich durch die sehr sensible und unruhige Wertanzeige des Drucksensors bzw. der Druckschwankungen aufgrund der Blasenbildung erklären.

Tabelle 4.8-3: Vergleich - Messung zu Berechnung, 450µm, RT

	Messung	nach GRACE	nach REH	Einheit
\dot{V}_{LP20_Norm}	16	17	23	[NI/min]

Die Kurven bei 850°C ergeben sich entsprechend nachfolgender Diagramme:

Druckverlustmessung: 450µm, 850°C

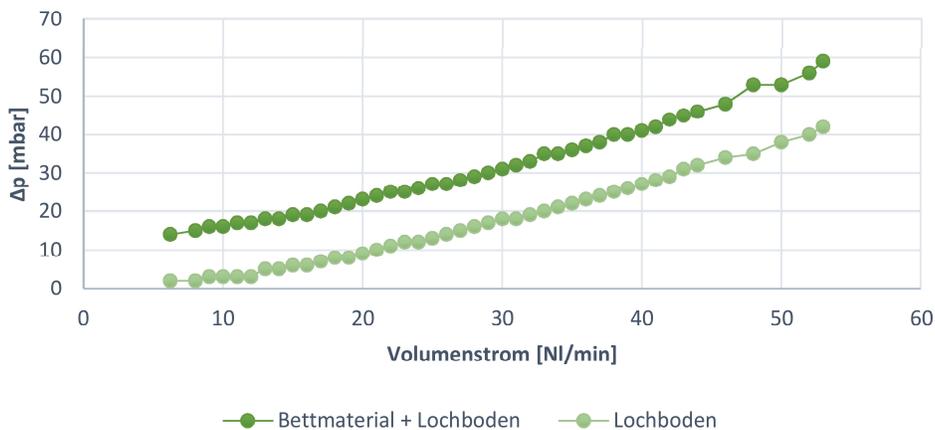


Abbildung 4.8-9: Druckverlustkurven - 450µm, 850°C

Druckverlust: Wirbelschicht, 450µm, 850°C

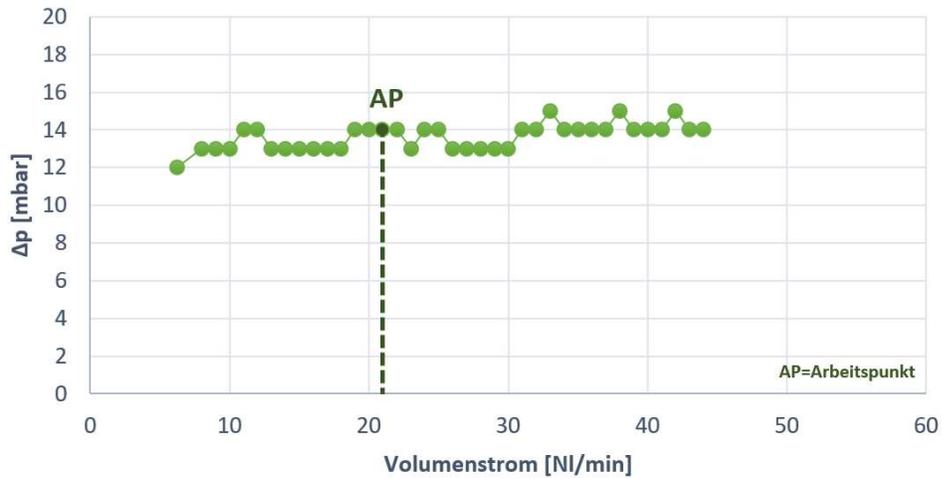


Abbildung 4.8-10: Druckverlustverlauf – 450µm, Wirbelschicht bei 850°C

Der relativ konstante Verlauf im Bereich der Wirbelschicht ist gut zu erkennen. Ebenso wurde der gewählte Arbeitspunkt bei 22 NI/min eingezeichnet. Eine Messung des Lockerungspunktes, im erwarteten Bereich von 2-3 NI/min, könnte durch das Anbringen eines zweiten Luft-Rotameters, parallel verschaltet zum hier verwendeten, gelöst werden.

Druckverlust/Volumenstrom-Diagramm

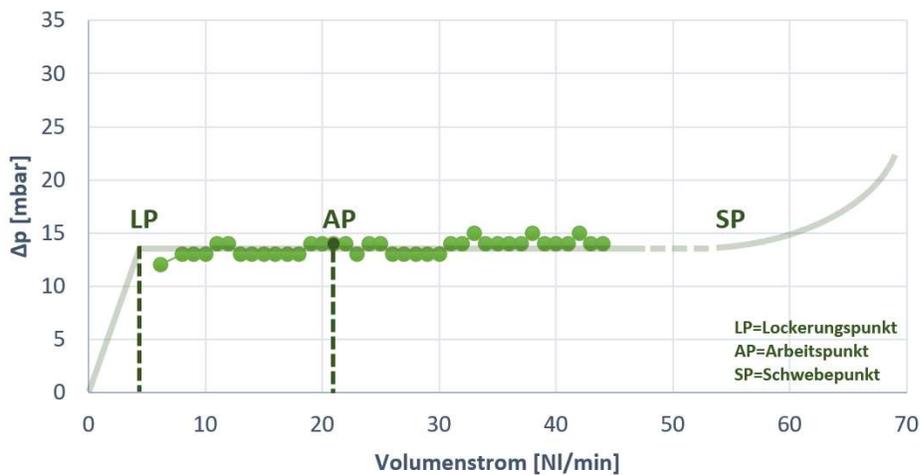


Abbildung 4.8-11: Druckverlust/Volumenstrom-Diagramm, 450µm, 850°C

Das aus den vorgenommenen Anpassungen folgende, zu hohe, Druckverlustverhältnis (lt. Messungen rund 70%), könnte durch eine Modifikation des Lochbodens oder Schütthöhe korrigiert werden. Mit folgenden Kombinationen, von Lochanzahl und -durchmesser, könnte ein Druckverlustverhältnis von 20% erreicht werden: $N=52$ und $d_0=1\text{mm}$; $N=31$ und $d_0=1,3\text{mm}$;

4.8.2 Versuch 1 und 2 - Wirbelschicht

In Tabelle 4.8-4 finden sich, nochmals zusammengefasst, die Einstellwerte der Versuche 1 und 2. Dabei stand die Gewinnung der Asche, zur Untersuchung im Erhitzungsmikroskop, im Fokus.

Tabelle 4.8-4: Einstellwerte Versuch 1 und 2

Komponente	Einstellwert	Funktion
Luft-Rotameter	22 NI/min (5bar)	Fluidisierung
N ₂ -Rotameter	1 NI/min* (5bar)	N ₂ -Spülung Bunker
Schütthöhe Bettmaterial	ca. 100mm	Betthöhe
Bettmaterial	450µm Quarzsand	Inertmaterial, Wirbelbett
Füllmenge Bettmaterial	300g	Gewicht Bettmaterial
Temperatur Reaktor	850°C	Erhitzung Reaktor
Temperatur Vorwärmung	550 - 600°C	Luftvorwärmung
Temperatur Heizmanschette	250 - 350°C	Luftvorwärmung
Füllmenge BM-Bunker**	360g (V1) / 3500g (V2)	Brennstoffspeicher
PID-Controller	sh. Tabelle 30	Temperaturregelung
Frequenz FU	0,5 Hz	Geschw. Förderschnecke
Art Biomasse	Zwiebelschalenpellets	Brennstoff
Versuchsdauer	45 min (V1) / 5 h (V2)	Betriebszeit

* 1 NI/min = 60 NI/h (Einheit am installierten Rotameter in NI/h)

** BM = Biomasse

Versuch 1: Dieser Versuch kann im Grunde als Funktionstest betrachtet werden und zeigte erstmals das Zusammenspiel aller Anlagenteile und Messeinheiten. Der Testlauf von 45 Minuten diente zum einen die Trägheit der Apparatur bei sich ändernden Parametern einschätzen zu können und zum anderen dazu die Messwerte auf deren Plausibilität zu überprüfen. Speziell die korrekte Anzeige der Temperatursensoren hat in Bezug auf Überhitzung und Durchbrand der Heizschalen oder anderer Anlagenteile eine besondere Wichtigkeit. Zudem muss auch die Sicherheit des Anlagenbetreibers gewährleistet sein. Der Testversuch lief ohne weitere Komplikationen ab und war die Voraussetzung für weitere Versuche.

Versuch 2: Die in Abbildung 4.8-12 dargestellten Messkurven geben den Temperaturverlauf der Thermoelemente während des gesamten Versuches wider. Der Gesamtversuch von Beginn der Aufheizung bis zur Abkühlung auf etwa 200°C dauerte über 9 Stunden. Dabei nimmt das Aufheizen der Apparatur eine Zeitspanne von rund 2 Std. und weiter 30 Minuten zum Erreichen eines stationären Betriebszustandes, ein. Das relativ langsame Regelverhalten der oberen Heizschalen hat den Vorteil, dass die Temperatur im Reaktor kaum bis gar nicht überschwingt.

Die starken Temperaturschwankungen der beiden Schalen (Graphen: Reaktor Schale, VW Schale) in der Aufheizphase, also vor 13:00 Uhr, wurden durch manuelles Ändern und Eingreifen bei den Einstellwerten der PID-Regler verursacht. Grund dafür war, um wiederum das Anlagenverhalten, bei Ändern von Temperaturwerten beobachten zu können. In ähnlicher Weise steigen auch die Temperaturen im Freeboard und der Flanschverbindung direkt beim Lochboden. Um ca. 12:30 Uhr wurde die Biomassezufuhr eingeschaltet, was sich auch deutlich durch den unruhigen Messkurvenverlauf der Wirbelschicht und ebenso der fallenden Temperatur der Reaktor Schale (kein Heizbetrieb) aufgrund der thermischen Umsetzung (erzeugten Wärme) bzw. stattfindenden Verbrennung der Biomasse, erkennen lässt. Das gleichmäßige Füllen der Förderschnecke und Einschwingen aller Temperaturkurven wurde um ca. 13:15 Uhr erreicht. Der Betriebszustand wurde nun als stationär betrachtet und kennzeichnet den Beginn der Versuchslaufzeit. Die Temperaturregler korrigierten nur in sehr geringem Maße die Leistung der Heizschalen respektive Temperaturen und liest sich ebenso in deren Messkurven ab. Die stetig sinkende Flanschttemperatur hin auf 600°C resultiert aus der geringeren Heizleistung der Reaktor-Heizschale ab dem Erreichen der 850°C bzw. Start der Biomassezufuhr. Die kritische Temperatur der Heizschalen liegt bei 1150°C, welche somit die maximale Betriebstemperatur darstellt. Das maximale ΔT zwischen Heizschale und der vorherrschenden Temperatur im Reaktor betrug kurzzeitig 240°C während der Aufheizphase. Dieses Delta wurde stets geringer und stellte sich während der stationären Phase auf einen Differenzwert von rund 80°C ein. Die maximal gemessene Schalentemperatur betrug 922°C (12:17 Uhr) und befand sich damit deutlich unterhalb der einzuhaltenden kritischen Temperatur von 1150°C. Ein Betreiben der Apparatur unter höheren Temperaturen kann folglich zugelassen werden. Ebenso gilt es, die kritische Temperatur des Flansches von 900°C nicht zu überschreiten. Limitierende Komponente ist hier die Flanschdichtung, welche bei über 900°C zu schmelzen beginnen würde. An dieser Stelle ist die maximale Temperatur im Bereich des Vorwärmzylinders zu erwähnen. Die dortigen Verschraubungen zur Temperatur- und Druckmessung sollten nicht dauerhaft mit über 650°C bestrahlt werden. Für den vorgesehenen Anwendungsbereich sind daher keine betriebstechnischen Einschränkungen zu erwarten. Der positive Temperatursprung der Messdatenkurve des Freeboards um ca. 12:45 bzw. 14:40 Uhr lässt auf eine möglicherweise stattgefundenen Nachverbrennung schließen. Die konstant bei rund 37°C gemessene Temperatur im Brennstoffbunker schließt die Rückströmung von Verbrennungsgasen in den Pelletbehälter und die damit verbundene Gefahr der Bildung eines brennbaren Gemisches aus. Nach einer Dauer von 4,5 Stunden im stationären Betrieb wurden die Heizschalen, bei fortlaufender Fluidisierung, abgeschaltet. Die Abkühlung fand entsprechend dem Diagramm langsam und gleichmäßig statt,

wobei die Temperatur des Vorwärm-Zylinders aufgrund der kühlen nachströmenden Luft etwas schneller abkühlt. Erst nach Erreichen einer Temperatur von ca. 200°C wurde die Apparatur unbeaufsichtigt gelassen und kühlte über Nacht weiter auf Raumtemperatur ab.

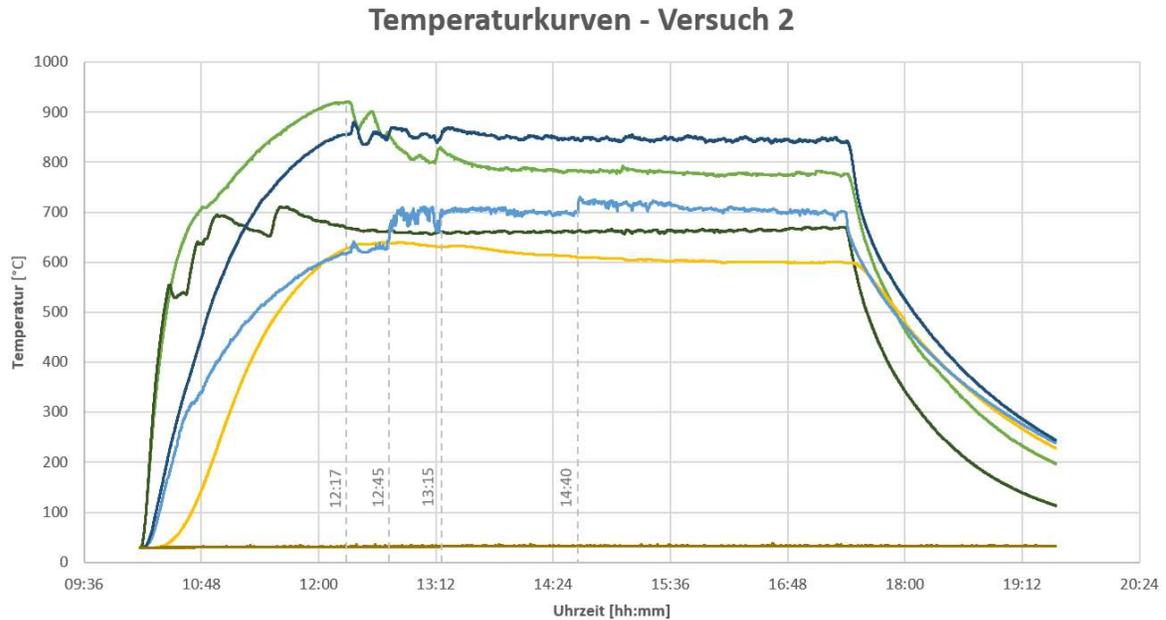


Abbildung 4.8-12: Temperaturkurven - Versuch 2

Nach Beendigung des Versuches wurde die Restmenge an Pellets im Bunker ausgewogen und ebenso das Bettmaterial mit der darin zurückgebliebenen Asche aus dem Wirbelschichtreaktor entnommen und gewogen.

Die Restmenge an Pellets im Bunker ergibt sich nach Glg. (4.8.2):

$$m_{ZS_V2} = m_{ZS_Start} - m_{ZS_Ende} = 3500 - 1383 = \underline{2117g} \quad (4.8.2)$$

$$\dot{m}_{BST_ZS_V2} = \frac{m_{ZS_V2}}{t_{V2}} = \frac{2117}{5} = \underline{423 \frac{g}{h}} \quad (4.8.3)$$

Das Auswiegen ergab folglich eine Fördermenge der Schnecke von 423g/h, gemessen über den gesamten Zeitraum in dem Pellets in die Apparatur befördert wurden. Gesamtgewicht von Bettmaterial und Asche ergab sich zu 323g. Die Menge an Asche im Bettmaterial wurde, nach dem Aussieben, später zur Untersuchung im Erhitzungsmikroskop verwendet (sh. Kapitel 4.8.3). Es geht hier deutlich hervor, dass ein Großteil der Asche als Feinasche durch den Kamin nach außen getragen wurde und ein weiterer Anteil als Ablagerungen in der Apparatur vorlag.

Das Aussieben der Asche erfolgte wiederum mit einem Siebturm (Maschenweiten: 400µm, 315µm, 160µm, 100µm). Dabei konnten neben der Asche auch kleinere Steine, welche in den

KAPITEL 4 – PRAKTISCHER TEIL

Pellets selbst miteingepresst waren, festgestellt werden. In sehr geringen Mengen wurden auch schwarze und glänzende Plättchen gefunden. Die silber-glänzenden Plättchen konnten eindeutig der Flanschdichtung zugeordnet werden, deren Oberfläche sich offenbar an den Rändern leicht ablöste. Nach sorgfältigem Aussieben der Asche konnte eine Gesamtmenge von knapp über 18g gewonnen werden. Dabei lag die Asche als Feinasche sowie als kleinere, ringförmige, Anbackungen, welche sich rund um die Bohrungen des Lochbodens ausprägten, vor. Die ringförmigen Ansammlungen der staubartigen Asche im Bereich um die Bohrungen lässt sich ansatzweise durch den Bernoulli-Effekt erklären. Dabei kommt es durch lokal unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten zu dem Effekt der unterschiedlich vorherrschenden Drücke. Durch die Abnahme des Druckes an den Stellen mit höherer Strömungsgeschwindigkeit können sich günstige Bereiche zur Ansammlung des feinen Aschestaubes ausprägen.

Nachfolgende Abbildungen dokumentieren die Ergebnisse von Versuch 2:



Abbildung 4.8-13: Lochboden mit Bettmaterial (nach Versuch)

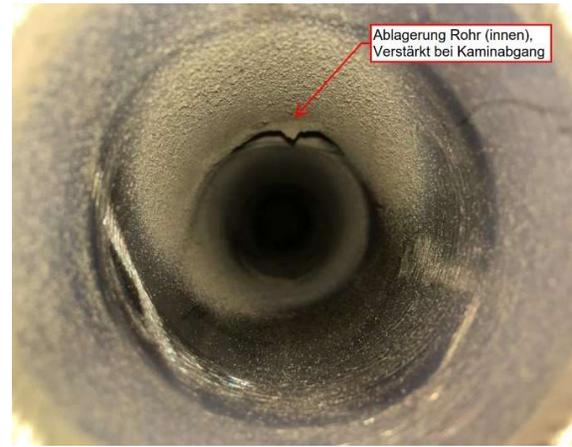


Abbildung 4.8-14: Innenablagerung Freeboard (Asche)

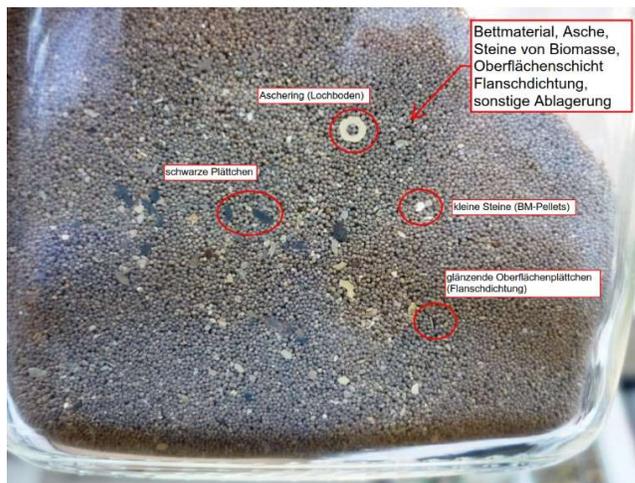


Abbildung 4.8-15: Gesamt-Bettmaterial (nach Versuch)



Abbildung 4.8-16: Ablagerung Lochboden

4.8.3 Ascheschmelzverhalten

Die Auswertung der Ascheschmelzversuche erfolgte nach DIN 51730 [28] (vgl. Kapitel 3.6.2). Dabei wurde die Asche nach EN 14775 [31] vorbereitet und präpariert. Ebenso wurde zusätzlich zu jenem Zeit-Temperaturprofil nach Norm (Veraschung bei 550°C, ZP-550) ein weiteres Aufheizprofil erstellt, welches dem Betrieb der Wirbelschichtapparatur ähnlich kommt (ZP-850).

Der Muffelofen wurde wie folgt programmiert: 25 – 500°C mit 8°C/min (60 Minuten)

kein Halten

500 – 850°C mit 8°C/min (44 Minuten)

Haltezeit 2,5 Stunden

Das eigens gewählte Zeit-Temperaturprofil wurde auf Grundlage von Versuch 2 erstellt, bei dem die Asche ebenfalls eine mittlere Verweilzeit von rund 2,5 Stunden bei 850°C aufweist.

Bei direktem Vergleich der erzeugten Aschen im Muffelofen konnte festgestellt werden, dass mit steigender Temperatur sich auch die Färbung hin zu dunkleren Farbtönen verändert. Die Färbung der Aschen aus der Versuchsapparatur wies ebenso eine Tendenz zur Verdunklung im Falle von längerer Veraschungsdauer. Somit spielen Zeit und Temperatur eine wesentliche Rolle bei Vergleich der Proben auf deren Optik.

Abbildung 4.8-17 zeigt die Ascheproben links beginnend mit der ausgesiebten Asche aus dem Wirbelschichtreaktor von Versuch 2, den beiden Aschen aus dem Muffelofen bei den Veraschungstemperaturen von 550°C bzw. 850°C, sowie den Filteraschen aus den im folgenden Kapitel 4.8.4 (Abgasmessung) beschriebenen Versuchen 3.1 und 3.2.



Abbildung 4.8-17: Ascheproben – Vergleich

KAPITEL 4 – PRAKTISCHER TEIL

Die Ascheproben wurden unter Anwendung der Arbeitsanweisung zur Bestimmung des Ascheschmelzverhaltens [45] des Prüflabors erzeugt und wie folgt beschrieben vorgegangen.

Die erzeugte Asche wurde nach der Zerkleinerung im Mörser und durch Zugabe von Ethanol in eine zylindrische Form gefüllt. Unter Verwendung einer Federdruck-Handpresse wurde die Paste in deren endgültige Form (Durchmesser sowie Höhe gleich 5mm) gebracht. Der Probezylinder wurde anschließend auf ein 10x12x1mm großen Probenplättchen aus Aluminiumoxid der Fa. Hesse Instruments positioniert und danach auf den Probenhalter des Erhitzungsmikroskops gelegt. Nach Fixierung des Probenhalters in der dafür vorgesehenen Position, wurde das Aufheizprogramm gestartet. Das für die Ascheschmelzversuche eingesetzte Erhitzungsmikroskop wird in Abbildung 4.8-18 (Fa. Hesse Instruments, Modell 2000 [46]) gezeigt. Ein mit dem Kamerasystem verbundenes Bildverarbeitungsprogramm zeichnet die optische Veränderung (Schattenbilder) der Probe während des gesamten Versuches auf und kann somit eine automatische Auswertung der charakteristischen Temperaturen vornehmen.

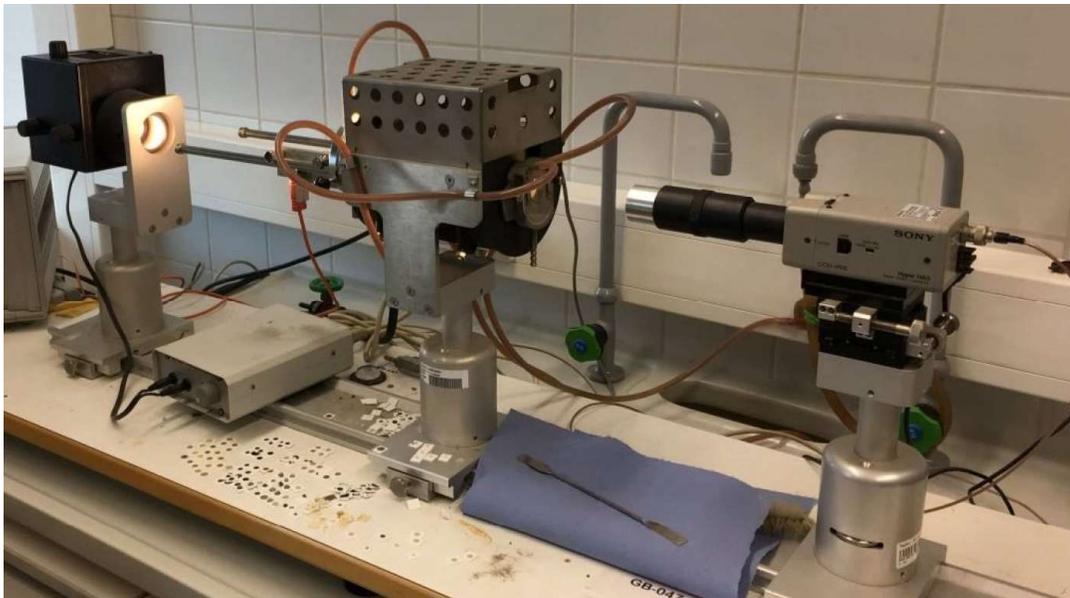


Abbildung 4.8-18: Erhitzungsmikroskop

Die in Kapitel 3.6.2 vorgestellten Methoden zur Ermittlung der Erweichungstemperaturen durch Anwendung des Dreiecksdiagramm oder der Modellgleichung [34], konnten aufgrund fehlender Ascheanalysen, nicht herangezogen werden. Der Vergleich des Ascheschmelzverhaltens bzw. Ermittlung der charakteristischen Temperaturen erfolgt hier mit dem Auswerten der Schmelzkurven. Dabei wird die Flächenänderung (in %) der Proben-Schattenbilder während des Schmelzversuches aufgezeichnet und mit der Ausgangsfläche (=Ausgangsbild mit dem

Flächenwert von 100%) verglichen. Somit können ausgehend von einem Startwert, welcher der Gesamtfläche der Probe entspricht, je nach Veränderungsgrad, die in der Norm definierten charakteristischen Temperaturen (z.B. DT) ermittelt werden. Das Auftreten von möglichen Sinter- und/oder Expansionsphasen können ebenso wie das Fließen der Probe im Schmelzverlauf abgelesen werden. Das Ende eines Ascheschmelzversuches stellt das Erreichen der Fließtemperatur der Probe oder der Maximaltemperatur (1500°C) des Erhitzungsmikroskops dar.

Ein Vergleich der Erweichungs- und Fließtemperatur der Proben, erzeugt im Muffelofen bei 550°C bzw. 850°C, zeigt keine wesentliche Beeinflussung durch die unterschiedliche Veraschungstemperatur (vgl. Abbildung 4.8-19). Die charakteristischen Temperaturen liegen sehr eng beisammen und ebenso die Schmelzkurven sind qualitativ ähnlich. Der relativ konstante Verlauf der 850°C-Kurve bis ca. 1000°C deutet darauf hin, dass die meisten flüchtigen Bestandteile schon während der Ascheerzeugung entwichen sind. Die 550°C-Kurve zeigt hier eine etwas stärkere Ausprägung einer Expansion. Die Sinterphase setzt bei ZP-550 etwas früher ein und zeigt im Gesamten eine flachere Ausprägung bis zur Erweichungstemperatur von 1320°C, verglichen zu ZP-850. Danach ist die Fließtemperatur der beiden Proben relativ rasch erreicht und unterscheidet sich nur gering.

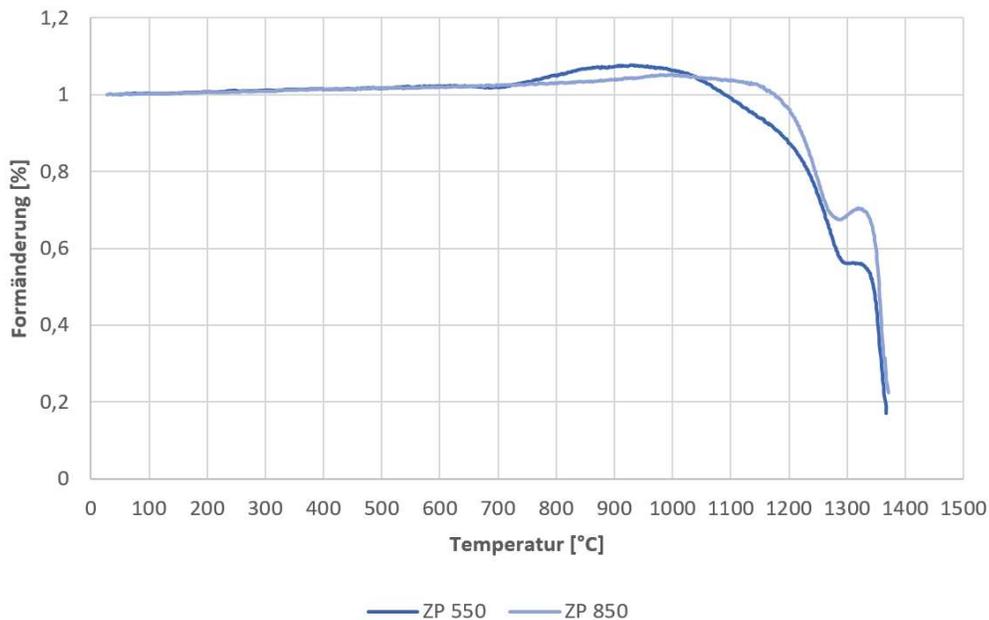


Abbildung 4.8-19: Ascheschmelzkurven - ZP-550 und ZP-850

Die in Tabelle 4.8-5 angegebenen Temperaturwerte wurden mittels der automatischen Bildauswertung des optischen Systems am Erhitzungsmikroskop sowie einer entsprechenden händischen Nachkontrolle der Proben-Schattenbilder ermittelt (sh. beispielhaft Abbildung 4.8-21).

Tabelle 4.8-5: Vergleich Erweichungs-, Fließtemperatur – Proben Muffelofen

	ZP-550	ZP-850	Einheit
Erweichungstemperatur	1320	1310	[°C]
Fließtemperatur	1370	1380	[°C]

Die Schmelzkurven der gewonnenen Aschen aus den Versuchen an der Apparatur werden im nachfolgenden dargestellt und beschrieben (vgl. Abbildung 4.8-20).

Klar zu erkennen ist abermals die qualitative Ähnlichkeit der Ascheschmelzkurven. Dabei zeigen alle Kurven einen konstanten Anstieg bis rund 1000°C und anschließender Sinterphase. Anhand der dargestellten Schmelzkurven und direkten Vergleich zur 850°C-Kurve der Probe aus dem Muffelofen, ist festzustellen, dass die Ascheproben aus den Wirbelschichtversuchen eine geringere Erweichungs- als auch Fließtemperatur aufweisen. Am deutlichsten fällt der Unterschied im Vergleich zur Asche aus dem Wirbelschichtbett (ZP Versuch 2) aus. Hier ist ein ΔT von 50°C festzustellen. Ganz ähnlich verhält sich die Filterasche aus Versuch 3.2, welcher im folgenden Kapitel beschrieben wird. Hingegen ergibt sich aus dem Vergleich mit der Filterasche aus Versuch 3.1 ein Ergebnis, welches dem der Probe aus dem Muffelofen mit 850°C respektive 550°C, wiederum sehr ähnlich ist (vgl. Kapitel 4.8.4 – Versuch 3). In Tabelle 4.8-6 werden die ermittelten charakteristischen Temperaturen der Ascheproben aus den WS-Versuchen zusammengefasst.

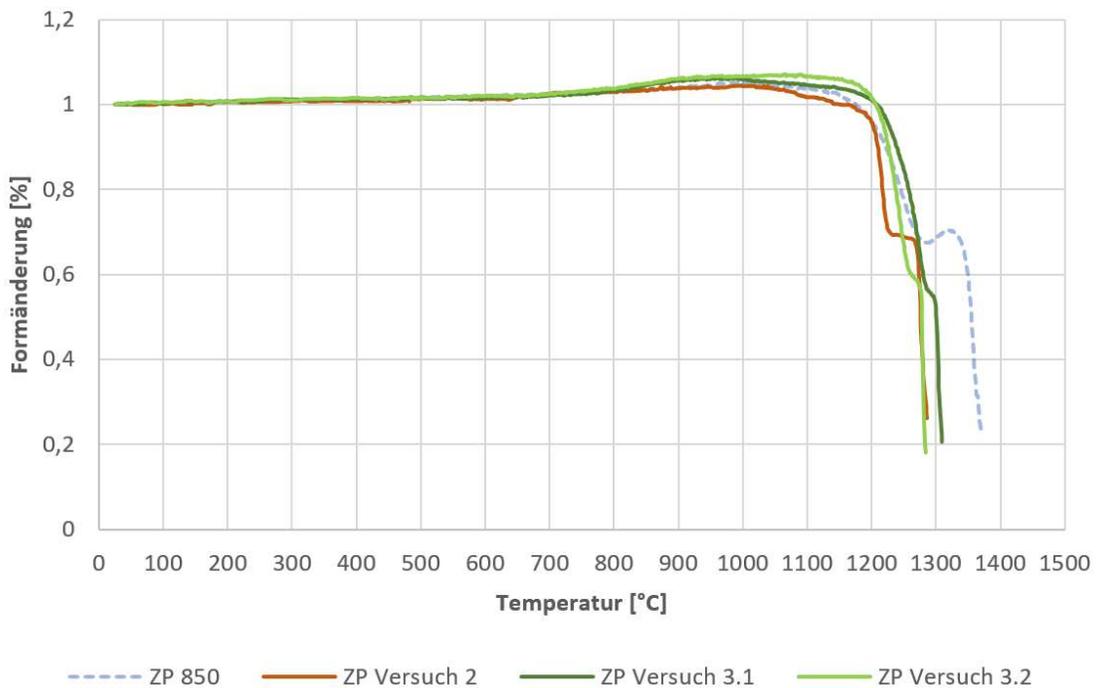


Abbildung 4.8-20: Ascheschmelzkurve - Versuche 2 und 3

Tabelle 4.8-6: Vergleich Erweichungs-, Fließtemperatur – Proben Wirbelschichtapparatur

	ZP-V2	ZP-V3.1	ZP-V3.2	Einheit
Erweichungstemperatur	1260	1300	1270	[°C]
Fließtemperatur	1290	1320	1290	[°C]

Auf Grundlage der vorgenommenen Ascheschmelzversuche konnte eine Tendenz hin zur Senkung der Erweichungstemperaturen festgestellt werden. Gleiches gilt in Bezug auf die Fließtemperaturen. Eine Erklärung dafür könnte der sich stark unterscheidende Veraschungsvorgang in der Wirbelschicht zu jenem im Muffelofen sein. Der vorherrschende Effekt der ständigen Verwirbelung bzw. Umwälzung der Asche mit dem Bettmaterial und unverbrannter Biomasse, stellt einen permanenten Zerreibungsprozess und Austrag dar. Hingegen erfolgt die Veraschung im Muffelofen völlig statisch und ohne jeglicher Bewegung der Proben. Somit werden die Fraktionierung und Interaktion der Asche mit dem Bettmaterial nicht berücksichtigt und stellt eine wesentliche Unterscheidung zu den tatsächlichen Wirbelschichtverhältnissen dar. Die, sehr naheliegende, Annahme von Abriebeffekten innerhalb des Wirbelbetts hat nun, vom Bettmaterial abhängig, mehr oder weniger starken Einfluss auf die anfallende Asche. Im Falle von Quarzsand, als Bettmaterial, kann es zu Reaktionen des Bettmaterials und der anfallenden Asche kommen (z.B. im Quarzsand enthaltenes SiO_2 bildet mit Alkalisalzen wie KCl niedrigschmelzende Eutektika) und den Erweichungspunkt der Asche hin in Richtung Erniedrigung verändern. Die, im Zuge dieser Versuche, festgestellten Erniedrigungseffekte der charakteristischen Ascheschmelztemperaturen decken sich ebenso mit Feststellungen, welche in einschlägiger Literatur zu finden sind (vgl. Kapitel 3.6.3, [35]).

Nun kann festgehalten werden, dass neben der Farbgebung, auch die charakteristischen Temperaturen der Proben, bei Veränderung des Veraschungsprofils und vor allem des Veraschungsprozesses, beeinflusst werden. Ein, an den Anwendungsfall, individuell angepasstes Veraschungsprozedere kann ein noch aussagekräftigeres Ergebnis liefern.

Nachfolgende Abbildung 4.8-21 zeigt beispielhaft die aufgenommenen Schattenbilder (Bild-Analyse) der Ascheprobe aus Versuch 2.

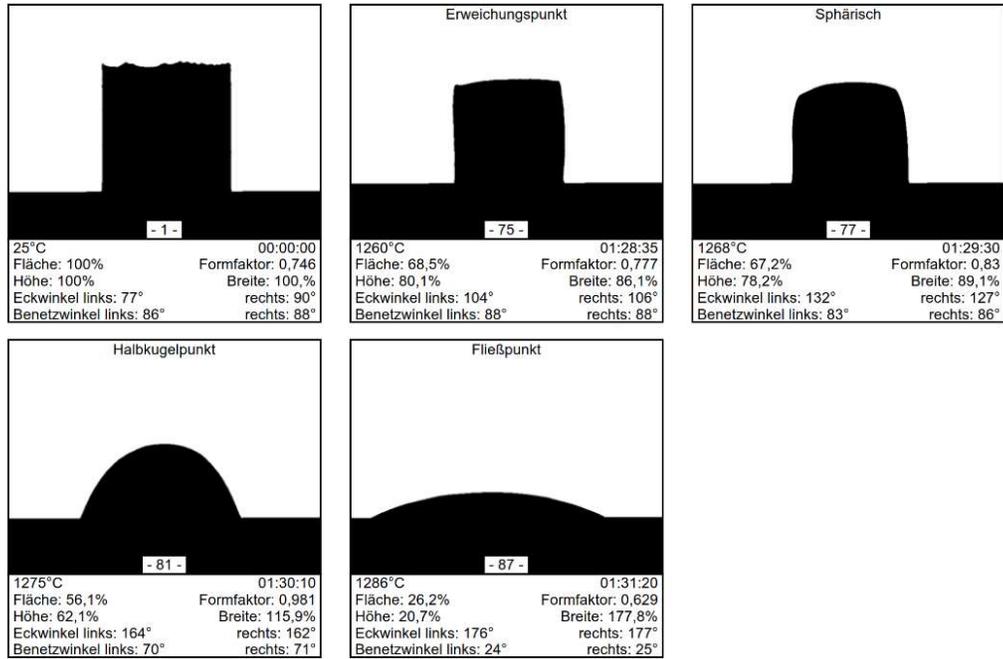


Abbildung 4.8-21: Bild Analyse (EMI II) - Versuch 2

4.8.4 Versuch 3 – Abgasmessung

Den Abschluss des praktischen Teiles bilden die beiden Versuche mit temporär aufgebautem Equipment zur Abgasmessung. Ursprünglich wurde eine Abgasmessung nicht vorgesehen, da der Anschlussflansch des Kaminrohres die Schnittstelle für weiterführende Arbeiten definiert. Um dennoch keine konstruktiven Maßnahmen setzen zu müssen, wurde der bereits montierte Flansch zum Anschluss von Filtern und/oder Messequipment vorgesehen.

Das für diese Versuche verwendete Messequipment wurde vom Prüflabor für Feuerungsanlagen zur Verfügung gestellt. Der provisorische Aufbau bzw. Positionierung der Messsonde, wurde zur Durchführung der Versuche als ausreichend betrachtet, mit der Zielsetzung, erste Aussagen zur Verbrennung tätigen zu können. Die Ergebnisse stellen auch erste Ansatzpunkte für weiterführende Optimierungen hinsichtlich der Verbesserung des Verbrennungsprozesses dar.

Der Gesamtaufbau wird in Abbildung 4.8-22 gezeigt. Als Messstelle für die Abgassonde inklusive Filter wurde der Messeingang des Thermoelements des Freeboards, am oberen Flansch der Apparatur, verwendet (vgl. Abbildung 4.8-23). Diese Positionierung hatte den Vorteil, dass keine konstruktiven Schritte zur Messdurchführung notwendig waren. Die Hauptkomponenten des Messequipments stellen sich zusammen aus einem Kompressor zur Ansaugung der Abgasprobe, dem zugehörigen beheizbaren Schlauch sowie dem Abgasfilter, welcher die angesaugte Gasprobe aus dem Abgasstrom von den Aschepartikeln (=Filterasche) filtert. Die Auswertung erfolgt durch ein entsprechendes Analysegerät.

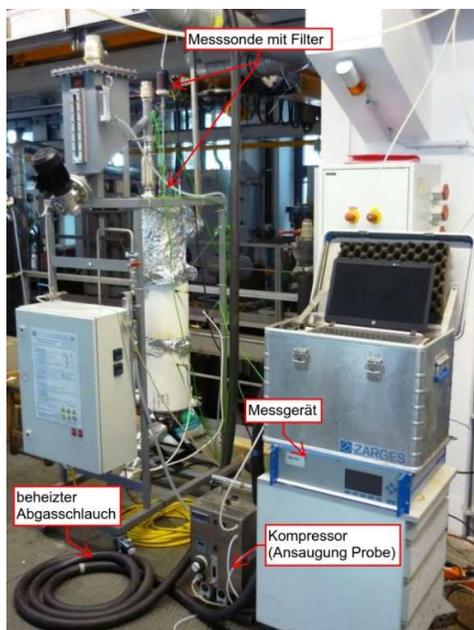


Abbildung 4.8-22: Messaufbau - V3

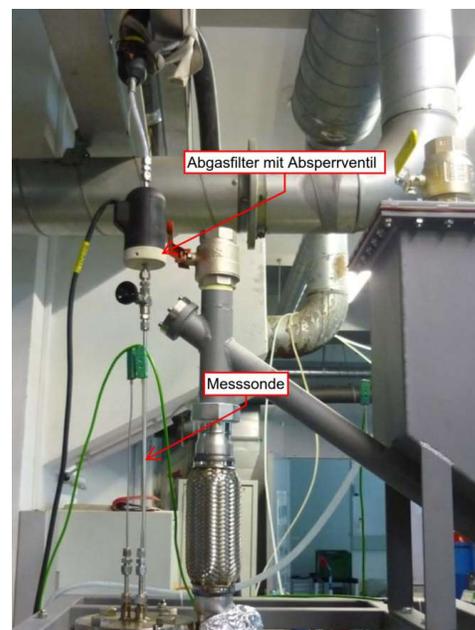


Abbildung 4.8-23: Aufbau Messsonde - V3

Versuch 3.1: Die gewählten Einstellwerte hinsichtlich Volumenströme und zugeführter Brennstoffmenge entsprechen jenen des vorangegangenen Versuchs 2 (vgl. Kapitel 4.8.2).

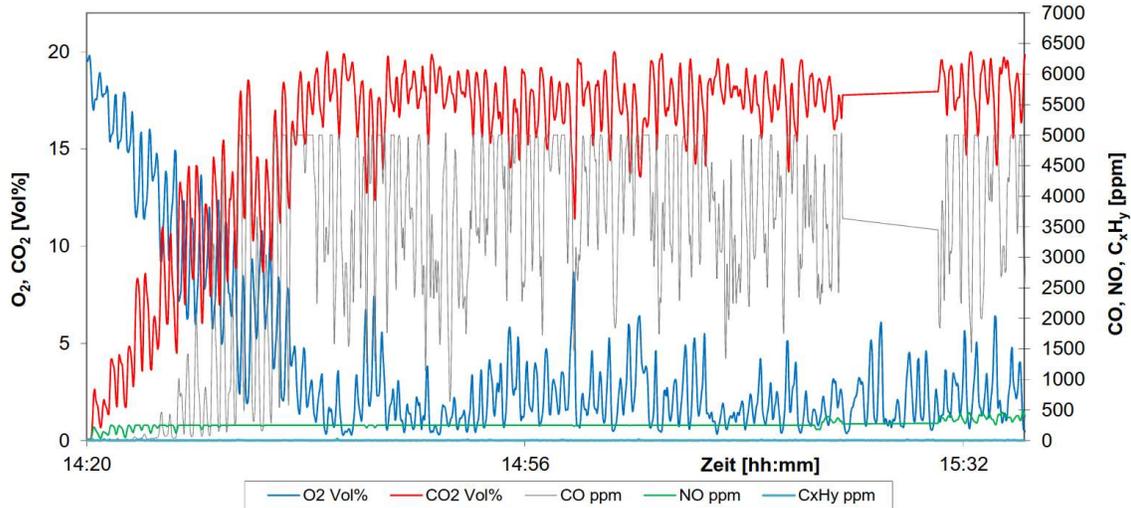


Abbildung 4.8-24: Abgasmessung - Versuch 3.1

Nach Beginn der Messung sank der O₂-Gehalt, stetig von den in der Luft enthaltenen 21%, auf rund 18% herab. Dies ist aufgrund der allmählich messbaren N₂-Spülung, welche einen Anteil von etwa 3-4% bei eingestelltem Volumenstrom einnimmt und entsprechend zeitverzögert, nach Überwindung des Bunkers und Förderschnecke, gemessen wird. Ab Beginn der Brennstoffzufuhr (ca. 14:20 Uhr) zeigt sich der charakteristische Verlauf der CO₂-Kurve nach oben und O₂-Kurve nach unten. Der gemessene Anteil an NO entsteht zum einen durch Umsatz des im Brennstoff enthaltenen Stickstoffs, sowie dem aus der Luft. Ebenso ist im geringen Maße auch die N₂-Spülung zu beachten. Der zu geringe O₂-Anteil während der Verbrennung bestätigt die Problematik mit der schon angesprochenen Mindestzufuhrmenge an Brennstoff durch die Förderschnecke. Ein Restsauerstoff im Bereich von 7-12% sollte hier angestrebt werden. Ebenso schlägt sich dies im Verlauf der CO-Messkurve nieder. Der CO-Wert sollte möglichst niedrig sein und im Bereich von 1000ppm liegen. Hier ist anzumerken, dass die Positionierung der Messsonde nicht ideal gewählt ist. Es ergibt sich die Annahme, dass das Messrohr zu weit in den Bereich der Wirbelschicht ragt und somit zu nahe an der Verbrennungszone liegt. Eine Messung direkt im Kaminrohr würde hier vermutlich niedrigere CO-Werte liefern, aufgrund der vollständigeren Umsetzung zu CO₂.

Die Berechnung von Lambda, über die trockene Abgasmenge respektive Quotienten des maximalen zu gemessenem CO₂-Gehalt, ergibt ein Lambda von knapp 1,3.

$$\lambda_{3.1} = \frac{CO_{2,max}}{CO_{2,gem}} = \underline{1,27} \quad (4.8.4)$$

4.9 Optimierungsmöglichkeiten

4.9.1 Konstruktive Optimierung

Die im nachfolgenden aufgeführten möglichen Optimierungen gehen aus den ersten Erfahrungen durch die Versuchsdurchführungen hervor und können dazu beitragen, die Apparatur im Hinblick auf Performance und einfachere Betreibbarkeit, zu verbessern und optimieren.

Brennstoffzufuhr: Bei der Brennstoffzufuhr stellte sich die Problematik der zu großen Fördermenge heraus. Die angefertigte Schnecke transportiert zu viel an Brennstoff in den Reaktor, trotz Einstellung der kleinstmöglichen Frequenz am Frequenzumrichter. Möglichkeiten zur Reduzierung der Fördermenge ist der Austausch oder Neuanfertigung einer zweiten Förderschnecke, die Verwendung eines langsameren Motors (Drehzahlreduzierung um rund 1/3), ein zusätzliches Getriebe zwischen Motor und Getriebe (minimale Reduktion der Drehzahl um den Faktor 7) oder das bestehende Getriebe durch ein neues Doppelschneckengetriebe (2 neue Getriebe) zu ersetzen. Letztere Variante bietet die meisten Optionen, stellt jedoch auch die kostspieligste Möglichkeit dar.

Entleerung: Trotz der konstruktiven Rücksichtnahme (Schüttkegel des Bettmaterial, siehe Kapitel 4.3.7) durch besonders großer Ausführung der Lochplatte, rieselt bei Öffnung und Absenkung der Flanschverbindung eine Teilmenge des Bettmaterials durch die konstruktiv notwendigen Flanschbohrungen (vgl. Abbildung 4.4-12) hindurch. Eine mögliche Optimierung wäre das punktuelle Anschweißen eines zusätzlichen, im Reaktorrohr innenliegenden dünnen, Zylinderrohres direkt am Lochboden in dem sich das Bettmaterial sammelt und somit einen Materialverlust verhindert.

Einfüllstutzen: Das Einschweißen eines zusätzlichen Stutzens inklusive Kugelhahnes direkt oberhalb des Kompensators zur Förderschnecke, würde eine gute Möglichkeit zur einfachen Befüllung des Reaktors mit Bettmaterial darstellen und gleichzeitig die Möglichkeit zur Durchführung von Batch-Versuchen schaffen.

Lüfter Motor: Aufgrund der sehr niedertourigen betriebsweise des Antriebsmotors durch die meist notwendige niederfrequente Einstellung am Frequenzumrichter, erzeugt der integrierte Lüfter am Motor keinen genügend großen Luftstrom, um die Abwärme abzutransportieren. Die Selbstkühlung ist daher nicht im ausreichendem Maße gegeben, was zu einer stetigen Erwärmung

des Motors führt. Die Anbringung eines externen Lüfters direkt am Motorgehäuse wäre hier als Überhitzungsschutz anzudenken.

Lüfter E-Schrank: Der Einbau von Axial-Lüftern direkt in der Schrankwandung oder -tür wäre zum Abtransport der Abhitze aller Elektro-Komponenten innerhalb des, grundsätzlich verschlossenen, Schaltkastens eine sicherheitsrelevante Optimierung.

4.9.2 Mess- und prozesstechnische Optimierung

Messstellenpositionierung / Abgasmessung: Grundsätzlich wurde die Positionierung und Planung der Messstellen hinsichtlich Betrieb und Überwachung der Wirbelschichtapparatur vorgenommen. Eine zusätzliche Ausführung einer Messstelle, zur expliziten Nutzung als Abgasmesssonde (zum Beispiel im Kaminrohr) sollte hier für zukünftige Versuchsdurchführungen angedacht werden und stellt gleichermaßen eine Funktions- und Nutzungserweiterung der Apparatur dar. Eine damit verbundene Erweiterung der Apparatur mit Zyklon und Filter zur Partikelabscheidung könnte den nächsten Schritt, einer im weiteren Sinne geltenden Optimierung, darstellen.

Brennstoffzufuhr: Die schon unter Kapitel 4.9.1 ausgeführte Optimierung ist der Vollständigkeit halber auch hier zu nennen, da die zugeführte Menge an Brennstoff wesentlichen Einfluss am Verbrennungsprozess hat.

Lochboden: Nicht direkt relevant für diese Arbeit, dennoch eine einflussreiche Optimierung des Verbrennungs- und Vergasungsprozesses stellt die optimale Anpassung des Lochbodens dar. Die Anpassung hinsichtlich Anzahl und Durchmesser der Löcher sollte für jede Versuchsreihe neu bewertet werden und gegebenenfalls ein neuer Lochboden angefertigt, vorhandene Löcher aufgebohrt oder zugeschweißt werden.

Bettmaterial: Gleich wie für den Lochboden, gilt es, eine Neubewertung des Bettmaterials hinsichtlich Partikelgröße, Formfaktor und Zusammensetzung, anzustellen. Der Zusammenhang der erhöhten Luftmenge bei Verwendung von gröberem Bettmaterial hat auch hier wieder wesentlichen Einfluss auf die zuzuführende Brennstoffmenge, respektive auf den thermochemischen Prozess, sowie Ausführung des Lochbodens (Verlegung der Bohrungen durch das Bettmaterial).

Kapitel 5

Schlussbetrachtung und Ausblick

Dem Vorteil des breiten Anwendungsfeldes, hinsichtlich der verwendbaren Biomassen in Wirbelschichtanlagen, steht die Herausforderung der Vielfalt an unterschiedlichen Variationen an Brennstoffzusammensetzungen gegenüber. Sowohl in Bezug auf Form und Größe, können eine nahezu unendlich große Vielfalt an Rein- als auch Mischbrennstoffen in Betracht gezogen werden. Aus diesem Standpunkt heraus, stellt die Möglichkeit, eine Labor-Versuchsapparatur zu Prüfzwecken zur Verfügung zu haben, eine wesentliche Grundlage für weitere Forschungszwecke dar.

Die Performance von neuen Biomassebrennstoffen aus Abfallprodukten der Industrie und Landwirtschaft bekommen immer mehr an Bedeutung und stellen ein großes Potential im Hinblick auf Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit dar. Die Problemfelder im engen Zusammenhang mit der anfallenden Asche während des Verbrennungsprozesses von Biomasse, stellen nach wie vor ein herausforderndes Gebiet für die Wirbelschichttechnik dar und sollte demnach im Sinne der Forschung weiterhin konsequent vorangetrieben werden.

Auslegung der Versuchsapparatur: Für die Auslegung und Berechnung der Versuchsapparatur wurden die Ergebnisse durch Anwendung von empirischen Gleichungen zu jenen aus der Auslegung mittels Zustandsdiagramm gegenübergestellt. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Ergebnisse aus der grafischen Ermittlung stets über jenen aus den Modellgleichungen lagen. Dabei ist auf die zwangsläufig vorhandene Ungenauigkeit beim Arbeiten mit Diagrammen als wesentlicher Einflussfaktor hinzuweisen. Dennoch konnten im Vergleich zu den tatsächlichen Ergebnissen aus den vorgenommenen Messungen an der Apparatur, gute Näherungen erzielt

SCHLUSSBETRACHTUNG UND AUSBLICK

werden. Der gemessene Lockerungspunkt bei 20°C lag für $d_p=350\mu\text{m}$ genau zwischen jenen, aus den Berechnungen, erwarteten Werten. Im Vergleich dazu ergab sich bei $d_p=450\mu\text{m}$ ein geringerer Volumenstrom als erwartet. Die Lockerungspunkte bei 850°C konnten aufgrund des zu großen Messbereiches des Rotameters, nicht direkt auf der Skala abgelesen werden. Dennoch konnte durch Messung des Druckverlustes der Lockerungspunkt in einem zu erwartenden Volumenstrombereich nachvollzogen werden. Durch Aufzeichnung des Druckverlustes über den gesamten Messbereich des Rotameters konnte gezeigt werden, dass die, auf Grundlage der Auslegung, festgelegten Arbeitspunkte im angestrebten Wirbelschichtbereich liegen. Die im Kaltbetrieb beobachtete bzw. im Heißbetrieb gemessene Ausprägung der Wirbelschicht zeigte eine ebenso korrekte Auslegung des Lochbodens. Das angestrebte Druckverlustverhältnis von Lochboden zu Wirbelschicht von 15% wurde mit einem tatsächlich gemessenen Verhältnis von 21% nicht exakt getroffen. Die durchgeführten Versuche wurden zu Vergleichszwecken, als auch auf Grund der höher als erwarteten Fördermenge der Pelletschnecke, mit 350 μm und 450 μm Quarzsand als Bettmaterial durchgeführt. Die bei der Auslegung des Rotameters angedachte Toleranz hin zu höheren Volumenströmen respektive größerem Bettmaterial wurde bei den Versuchen ebenso bestätigt.

Die Inbetriebnahme der Förderschnecke und die nachfolgenden Kalibrierungsversuche zeigten teilweise sehr unterschiedliche Ergebnisse beim Vergleich von Holz- zu Zwiebelschal pellets. Eine geringfügige Abweichung der Dichteverhältnisse sowie Außenabmessungen haben einen starken Einfluss auf die Fördermenge der Pellets gezeigt. Aus diesem Grund ist eine Neukalibrierung für jede Versuchsreihe bzw. Biomasse zwingend vorzusehen.

Verbrennungsversuche: Bei den Verbrennungsversuchen (Versuch 1 und 2) kamen pelletierte Zwiebelschalen als Brennstoff zum Einsatz. Der hohe Aschegehalt, sowie die, aus der Versuchsdatenbank des Prüflabors für Feuerungsanlagen, bekannte Erweichungstemperatur von über 1300°C, erfüllten die Anforderungen an den Biomassebrennstoff zur Durchführung der Erstversuche. Ebenso wurde bevorzugt nach einem unkritischen Brennstoff gesucht, was ebenso aus vorangegangenen Brennstofftests des Prüflabors bestätigt werden konnte. Während der Versuche konnten keine Agglomerationsprobleme festgestellt werden und ebenso wurde keine messbare Menge an Bettmaterial ausgetragen. Das problemlose Verhalten des Bettmaterial in Zusammenspiel mit der verwendeten Biomasse, kann auf die im Vorfeld durchgeführte Auswahl der Materialien zurückgeführt werden. Speziell bei Erstversuchen ist es sinnvoll die Auswahl zugunsten von nachweislich unproblematischen Materialien zu treffen.

Abgasmessung: Die im Zuge der Abschlussversuche durchgeführten Abgasmessungen (Versuche 3) zeigten einen nicht optimalen Verbrennungsprozess in der Wirbelschicht. Hauptgründe, für die hohen CO- und niedrigen Restsauerstoffwerte, liegen vor allem bei der nicht optimalen Positionierung der Messsonde (zu nahe an der Wirbelschicht) und der zugeführten Biomasse-Menge. Erst nach erfolgter konstruktiver Fertigstellung können die tatsächlichen Fördermengen der Schnecke ermittelt werden, welche im Wesentlichen mit der Gewindesteigung der Schnecke und der maximal möglichen Drehzahldrosselung durch den Frequenzumrichter, zusammenhängen. Es wurde versucht, aufgrund der gegebenen höheren Zufuhrmenge an Brennstoff, den Volumenstrom und Korngröße des Bettmaterials anzupassen und damit die höhere Zufuhr rate abzufedern bzw. auszugleichen. Die Voraussetzungen, zur Verwendung von größeren Bettmaterialdurchmesser und folglich der Erhöhung des Volumenstromes respektive zugeführter Luftmenge, sind im Wesentlichen alle gegeben.

Ascheschmelzversuche: Vorab wurden die Erweichungstemperaturen der Zwiebelschalenpellets unter normativen Veraschungsverhältnissen im Muffelofen bei 550°C und 850°C, mit teilweise angepasstem Aufheizprofil, verglichen. Dabei konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Lediglich die Sinterphase der 850°C-Asche begann deutlich später. Eine kaum vorhandene Expansionsphase kann aufgrund der ausgeprägten Entgasung an flüchtigen Bestandteilen im Vergleich zur Veraschung mit 550°C erklärt werden. Die Erweichungstemperatur der beiden Ascheproben lag mit einer Differenz von nur 10°C, bei 1320°C (Veraschungstemperatur mit 550°C) bzw. 1310°C. Das aus vorausgegangenen Forschungsarbeiten und Publikationen bekannte Verhalten der Erniedrigung des Erweichungspunktes der Wirbelschichtasche, konnte auch bei den in dieser Arbeit durchgeführten Versuche bestätigt und beobachtet werden. Am deutlichsten wurde die Erweichungstemperatur der Bettasche gesenkt. Mit einem Wert von 1260°C ergab sich eine Erniedrigung von 50°C im Vergleich zur 850°C-Asche aus dem Muffelofen. Die Erweichungstemperaturen der Flugaschen aus den Versuchen 3, ergaben eine Senkung von 10°C und 40°C auf 1300°C bzw. 1270°C. Mit gleicher Tendenz und in deutlich größerem Ausmaß, zeigt sich der Unterschied bei den Fließtemperaturen, welche sich um 60°C bzw. 90°C hin zur niedrigeren Temperaturen verschoben haben. Betrachtet man die Verläufe der Schmelzkurven, so zeigen alle Versuche qualitativ keine signifikanten Unterschiede. Die Senkung der charakteristischen Temperaturen lassen sich auf die stattfindenden Reaktionen zwischen Bettmaterial und der erzeugten Biomasseasche zurückführen. Bei der Anwendung von Quarzsand reagiert beispielsweise das dort enthaltene SiO₂ (Mineral Quarz) mit Alkalimetallen wie Kalium

SCHLUSSBETRACHTUNG UND AUSBLICK

und bildet niedrigschmelzende Eutektika. Anzumerken ist hier der relativ hohe Gehalt an Chlor (0,23 Masse-%) in den Zwiebelschalenpellets und der Annahme der Bildung von Kaliumchlorid (KCl), welches sehr intensiv mit dem Bettmaterial interagieren kann. In der Mischung mit einigen Aschebestandteilen nimmt der Schmelzpunkt des Siliziumoxids ab und kann in weiterer Folge zu verstärkter Agglomeration führen. Eine Analyse der Aschebestandteile wäre hier äußerst interessant um eventuell noch vertiefende Zusammenhänge erschließen zu können.

Die Versuche zeigen allesamt, dass der reale Betrieb merkbar Einfluss auf das Schmelzverhalten der Asche nimmt und die unter Laborbedingungen (Muffelofen) festgestellten Erweichungstemperaturen immer kritisch betrachtet werden müssen. Dabei ist es von großer Bedeutung, die Haupteinflussfaktoren (Aschebestandteile, Bettmaterial, Prozessführung) zu kennen.

Ausblick: Die TU Wien kann im Bereich der Wirbelschichttechnik schon auf mehrere Jahrzehnte der Forschung und erfolgreicher Weiterentwicklung zurückblicken. Das Potential, hinsichtlich der Optimierungsmöglichkeiten, ist dennoch enorm und sollte zielgerichtet weitergeführt werden. Dabei stellen, neben den Versuchen mit unterschiedlichen („neuen“) Biomassebrennstoffen, die Verwendung alternativer Bettmaterialien ein weiteres Forschungsgebiet dar. Olivin und Kalkstein haben neben anderen fluidtechnischen Eigenschaften auch noch katalytische Eigenschaften und weisen teils unterschiedliche mechanische Beständigkeit auf. Auch können alternative Gase zur Fluidisierung herangezogen werden (z.B. reduzierende Verhältnisse). Die Zugabe von Additiven (z.B. Kalzium basierend) parallel zur Brennstoffzufuhr oder vorab als Mischungskomponente ist auch hier als eine weitere Möglichkeit der Versuchsvariation zu nennen.

Literaturverzeichnis

- [1] Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, „Welt im Wandel - Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation,“ WBGU, 2011.
- [2] A. Bauen, G. Berndes, M. Junginger, M. Londo und F. Vuille, „Bioenergy - A sustainable and reliable energy source (Main Report),“ IEA Bioenergy, 2009.
- [3] Österreichischer Biomasse Verband, „Basisdaten 2015 - Bioenergie,“ Österreichischer Biomasse Verband, Austrian Energy Agency, 2015.
- [4] M. Zichy, C. Dürnberger, B. Formowitz und A. Uhl, Energie aus Biomasse - ein ethisches Diskussionsmodell, 1. Hrsg., Vieweg+Teubner Verlag, 2011.
- [5] Österreichischer Biomasse Verband, „www.waermeausholz.at,“ [Online]. Available: <http://www.waermeausholz.at/info/faq/was-bedeutet-co2-neutral/>. [Zugriff am 03 09 2017].
- [6] S. Geitmann, Erneuerbare Energien und alternative Kraftstoffe - mit neuer Energie in die Zukunft, 2. Hrsg., Kremmen: Hydrozeit Verlag, 2005.
- [7] OENORM M 7101, Begriffe der Energiewirtschaft - Allgemeine Begriffsbestimmungen, ASI Austrian Standards Institute, 2013.
- [8] M. Kaltschmitt, H. Hartmann und H. Hofbauer, Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren, 3. Hrsg., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016.
- [9] DIN EN ISO 17225-1:2014, Biogene Festbrennstoffe - Brennstoffspezifikation und -klassen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen (ISO 17225-1:2014), DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2014.
- [10] R. Rauch und C. Pfeifer, Unterlagen zur Vorlesung Thermische Biomassenutzung, Technische Universität Wien, Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften, 2014.

- [11] H. Hofbauer, Unterlagen zur Vorlesung Basic Engineering Auslegung verfahrenstechnischer Prozesse und Anlagen IV - Verbrennungsanlagen, Technische Universität Wien, Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften, 2016.
- [12] H. Kitzler, Dissertation Zweibettwirbelschicht-Dampfvergasung von biogenen, ascheintensiven Brenn- und Reststoffen, Einfluss der Asche auf den Prozess, Technische Universität Wien, Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften, 2013.
- [13] B. Von der Heide, „Möglichkeiten und Grenzen der SNCR-Verfahren,“ in *Abfallwirtschafts- und Energiekonferenz, Sonderdruck aus "Energie aus Abfall" Band 9 (TK Verlag Karl Thomé Kozmiensky)*, Berlin, 2012.
- [14] H. Brauer, Grundlagen der Einphasen- und Mehrphasenströmungen, Aarau: Sauerländer, 1971.
- [15] H. Hofbauer, Unterlagen zur Vorlesung Wirbelschichttechnik, Technische Universität Wien, Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften, 2016.
- [16] P. Basu, *Combustion and Gasification in Fluidized Beds*, CRC Press, 2006.
- [17] S. Ergun, „Fluid flow through packed columns,“ *Chemical Engineering Progress*, Bd. 48, pp. 89-94, 1952.
- [18] C. Wen und Y. Yu, „A generalized method for predicting the minimum fluidization,“ *American Institute of Chemical Engineers Journal*, Bd. 12, p. 610 ff, 1966.
- [19] M. Kraume, *Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik - Grundlagen und apparative Umsetzungen*, Bd. 2, Berlin: Springer Vieweg, 2012.
- [20] L. Reh, „Das Wirbeln von körnigem Gut in schlanken Diffusoren als Grenzzustand zwischen Wirbelschicht und pneumatischer Förderung,“ Dissertation, TH Karlsruhe, 1961.
- [21] J. C. Schmid, T. Pröll, C. Pfeifer, R. Rauch und H. Hofbauer, „Cold flow model investigation on a modified riser with enhanced gas-solid contact – locating the regions of

- operation in a fluidization regime map,“ in *21st International Conference on Fluidized Bed Combustion*, Neapel, 3.-6. Juni 2012.
- [22] J. R. Grace, A. Avidan und T. Knowlton, *Circulating fluidized beds*, London: Blackie Academic & Professional, 1997.
- [23] D. Geldart, *Types of Gas Fluidization*, Bd. *Powder Technology*, Great Britain: Elsevier Sequoia SA, 1973, p. 285ff.
- [24] B. Gatternig, U. Hohenwarter und J. Karl, *Ascheproblematik in biomassegefeuerten Wirbelschichtenanlagen*, Graz: TU Graz, Institut für Wärmetechnik, 2010.
- [25] EN ISO 16967:2015–04, *Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung von Hauptelementen– Al, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na und Ti*, 2015: Austrian Standards Institute.
- [26] EN ISO 16968:2015–05, *Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung von Spurenelementen*, Austrian Standards Institute, 2015.
- [27] S. Vassilev, D. Baster und V. C. G., „An overview of the behaviour of biomass during combustion: Part I, Phase-mineral transformations of organic and inorganic matter,“ *Fuel*, Bd. 112, pp. 391-449, 2013.
- [28] DIN 51730:2007–09, *Prüfung fester Brennstoffe - Bestimmung des Asche Schmelzverhaltens*, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2007.
- [29] DIN 51719:1997–07, *Prüfung fester Brennstoffe - Bestimmung des Aschegehaltes*, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 1997.
- [30] CEN/TS 15370-1:2006-12, *Feste Biobrennstoffe - Verfahren zur Bestimmung des Schmelzverhaltens der Asche - Teil 1: Verfahren zur Bestimmung charakteristischer Temperaturen*, CEN, 2006.
- [31] EN 14775:2010–04, *Feste Biobrennstoffe – Bestimmung des Aschegehaltes*, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2010.
- [32] R. B. Piechota, *Untersuchungen zur nachhaltigen thermischen Nutzung fester regenerativer Energieträger*, Logos Verlag Berlin GmbH, 2011.

- [33] S. V. Vassilev, D. Baxter und C. G. Vassileva, „An overview of the behaviour of biomass during combustion: Part II. Ash fusion and ash formation mechanisms of biomass types,“ *Fuel*, Bd. 117, p. 152–183, 2014.
- [34] A. Friedl, E. Padouvas, H. Rotter und K. Varmuza, „Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition,“ Vienna University of Technology, Thermal Process Engineering and Process Simulation, Laboratory for ChemoMetrics, Vienna, 2004.
- [35] J. Karl, *Dezentrale Energiesysteme - Neue Technologien im liberalisierten Energiemarkt*, München: Oldenbourg Verlag München Wien, 2006.
- [36] DIN EN ISO 17225-2:2014-09, *Biogene Festbrennstoffe - Brennstoffspezifikationen und -klassen - Teil 2: Klassifizierung von Holzpellets*, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2014.
- [37] Parametric Technology , „www.ptc-de.com,“ Parametric Technology GmbH, [Online]. Available: <http://www.ptc-de.com/cad/creo/parametric>. [Zugriff am 5 September 2017].
- [38] *Datenblatt Edelstahl 1.4841*. [Performance]. Deutsche Edelstahlwerke GmbH, 2007.
- [39] *Datenblatt Quarzsand ME 0,3-0,8*. [Performance]. Quarzwerke Österreich GmbH, 2017.
- [40] A. Mersmann, *Thermische Verfahrenstechnik: Grundlagen und Methoden*, Springer-Verlag, 2013.
- [41] EN 15104:2011, *Feste Biobrennstoffe – Bestimmung des Gesamtgehaltes an Kohlenstoff, Wasserstoff und Stickstoff - Instrumentelle Verfahren*, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2011.
- [42] EN 15289:2011, *Feste Biobrennstoffe – Bestimmung des Gesamtgehaltes an Schwefel und Chlor*, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2011.
- [43] EN 14774-3:2009, *Feste Biobrennstoffe – Bestimmung des Wassergehaltes Ofentrocknung – Teil 3: Wassergehalt in allgemeinen Analysenproben*, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2009.
- [44] *Datenblatt Drucksensor DS2*. [Performance]. Kalinsky Sensor Elektronik GmbH & Co. KG, Drucksensortechnik, 2013.

- [45] Prüflabor für Feuerungsanlagen , „AA-38 Bestimmung des Ascheschmelzverhaltens Version 4,“ TU Wien, Wien, 2015.
- [46] Hesse Instruments, „Erhitzungsmikroskop mit automatischer Bildanalyse,“ Hesse Instruments, Dr. Axel Hesse, [Online]. Available: http://www.hesse-instruments.de/content/products_erhm.php?Hilang=de. [Zugriff am 4 September 2017].
- [47] S. V. Vassilev, D. Baster, L. K. Andersen und C. G. Vassileva, „An overview of the chemical composition of biomass,“ *Fuel*, Bd. 89, pp. 913-933, 2010.
- [48] W. Müller, *Mechanische Verfahrenstechnik und ihre Gesetzmäßigkeiten*, München: De Gruyter Oldenbourg, 2014.
- [49] J. Werther, „Fluidized-Bed Reactors,“ *Ullmann's encyclopedia of Industrial Chemistry*, Bd. 15, pp. 320-366, 2012.
- [50] A. Hiller und M. Cech, „Präsentation - Auslegung von Wirbelschichtanlagen,“ Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen Institut für Energietechnik, Dresden, 2009.
- [51] J. C. Schmid, „Development of a novel dual fluidized bed gasification system for increased fuel flexibility,“ Technische Universität Wien, Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften, Wien, 2014.
- [52] D. Kunii und O. Levenspiel, *Fluidization Engineering - Butterworth-Heinemann Series in Chemical Engineering*, 2, Hrsg., Butterworth-Heinemann, 1991.
- [53] Wachendorff Prozesstechnik, „Betriebsanleitung für PID-Regler,“ Wachendorff Prozesstechnik GmbH & Co. KG, Geisenheim, 2017.
- [54] T. S. GmbH, „Präsentation Wirbelschichtfeuerung,“ TBU Stubenvoll GmbH, Schlierbach, Austria.
- [55] E. E. A.S., „Instruction Manual ESM-4420 Temperature Controller with Universal Input,“ Emko Elektronik A.S., Dosab, Karanfil Sokak, 2007.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1-1: Vision zur globalen regenerativen Energieversorgung bis 2050 [1].....	4
Abbildung 2.1-2: Bioenergie im globalen Energiemix [2].....	4
Abbildung 2.2-1: Entwicklung Bruttoinlandsverbrauch Energie und Potenziale bis 2030 [3].....	5
Abbildung 2.2-2: Bruttoinlandsverbrauch Energie 2013 [3].....	6
Abbildung 2.2-3: Bruttoinlandsverbrauch erneuerbare Energieträger 2013 [3].....	6
Abbildung 3.1-1: CO ₂ -Kreislauf [5]	8
Abbildung 3.1-2: Zusammensetzung und Bildung der Pflanzensubstanz [8].....	10
Abbildung 3.1-3: Bioenergieträger nach Aggregatzustand [4]	11
Abbildung 3.2-1: Ablauf und Phasen der thermo-chemischen Umwandlung [8].....	19
Abbildung 3.3-1: Vorgänge bei der Vergasung [8]	20
Abbildung 3.3-2: Vergasungskonzepte (modifiziert) [8].....	22
Abbildung 3.3-3: Vergasungssysteme, fluiddynamische Unterscheidung [8].....	23
Abbildung 3.3-4: Zweibettreaktor-Konzept und Ausführung [10].....	24
Abbildung 3.4-1: Arten der stationären WS-Feuerung (mit/ohne Tauchheizflächen) [11].....	27
Abbildung 3.4-2: Stationäre Wirbelschichtfeuerung mit gestufter Verbrennung [54].....	28
Abbildung 3.4-3: Ausführung für Bettmaterialaustrag und -rückführung [54].....	28
Abbildung 3.4-4: Zirkulierende Wirbelschichtfeuerung (Babcock & Wilcox) [50].....	29
Abbildung 3.5-1: Druckverlustverlauf Wirbelschichttechnik (modifiziert) [48] [49].....	33
Abbildung 3.5-2: Übergangdiagramm – Wirbelschichtzustände [50].....	34
Abbildung 3.5-3: Wirbelschichtregime und Feststoffverteilung [12] [50]	35
Abbildung 3.5-4: Zustandsdiagramm nach Reh [15].....	37
Abbildung 3.5-5: Zustandsdiagramm nach Grace (modifiziert Schmid) [51]	38
Abbildung 3.5-6: Schüttgutklassifizierung nach Geldart [50]	39
Abbildung 3.5-7: Ausführungsformen von Gasverteilerböden (modifiziert) [52]	41
Abbildung 3.5-8: Mindestdruckabfall des Verteilerbodens [15].....	42
Abbildung 3.5-9: Druckverlust Lochboden [15]	42
Abbildung 3.5-10: Teilungsvarianten Lochboden (modifiziert) [15].....	43
Abbildung 3.6-1: Dreiecksdiagramm - SiO ₂ -CaO-K ₂ O System [33]	45
Abbildung 3.6-2: Einfluss der Aschekomponenten auf DT [33].....	46
Abbildung 3.6-3: Ablagerungsmechanismus der Aschepartikel [24].....	47

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 3.6-4: Mechanismen der Agglomeration [24].....	48
Abbildung 4.2-1: Funktionsschema Versuchsapparatur	52
Abbildung 4.2-2: BM-Zufuhr Variante 1 (oben).....	53
Abbildung 4.2-3: BM-Zufuhr Variante 2 (seitlich)	54
Abbildung 4.2-4: BM-Zufuhr Variante 3 (seitlich, Rutsche).....	54
Abbildung 4.2-5: CAD Vorderansicht	55
Abbildung 4.2-6: CAD Seitenansicht	55
Abbildung 4.2-7: CAD Draufsicht.....	56
Abbildung 4.2-8: CAD Vollschnitt.....	56
Abbildung 4.2-9: 3D-Explosionsdarstellung.....	56
Abbildung 4.2-10: Stückliste CAD-Zeichnung.....	56
Abbildung 4.2-11: CAD Gesamtdarstellung	57
Abbildung 4.3-1: Klassifizierung nach Geldart (modifiziert) [23] - Quarzsand 350 μ m	60
Abbildung 4.3-2: Arbeitspunkt (grafisch) - nach Grace (modifiziert).....	66
Abbildung 4.3-3: Arbeitspunkt (grafisch) - nach Reh (modifiziert).....	68
Abbildung 4.3-4: Widerstandsbeiwert - Lochplatte [40]	73
Abbildung 4.3-5: Dreieckteilung [15].....	74
Abbildung 4.3-6: Lochboden Kreisteilung.....	74
Abbildung 4.3-7: Lochboden Hex.-Teilung	74
Abbildung 4.3-8: Ausführung Rohrkompensator	79
Abbildung 4.3-9: Physikalische Eigenschaften Edelstahl 1.4841 [38].....	79
Abbildung 4.3-10: Schüttkegel Bettmaterial bei Öffnung der Flanschverbindung.....	80
Abbildung 4.4-1: Gesamtaufbau mit Messbox.....	81
Abbildung 4.4-2: Gesamtaufbau mit E-Schrank	81
Abbildung 4.4-3: Gesamtaufbau - Seite	82
Abbildung 4.4-4: Gesamtaufbau - Front	82
Abbildung 4.4-5: Aufbau mit Heizschalen.....	82
Abbildung 4.4-6: Aufbau Vorheizschlauch.....	82
Abbildung 4.4-7: Biomassebunker	83
Abbildung 4.4-8: Biomassezufuhr	83
Abbildung 4.4-9: BM - Zuführstutzen	84
Abbildung 4.4-10: Gesamtaufbau - BM Zufuhr.....	84
Abbildung 4.4-11: Förderschnecke mit Antriebsmotor	84
Abbildung 4.4-12: Anströmboden (Lochboden)	85

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 4.4-13: Entleerung Bettmaterial	85
Abbildung 4.4-14: Untere Flanschverbindung bei Luftzufuhr	85
Abbildung 4.4-15: Hebekonstruktion	85
Abbildung 4.4-16: Messstellenanordnung	86
Abbildung 4.4-17: Messstellenverschraubung	86
Abbildung 4.4-18: Messstellenanordnung Flansch oben	86
Abbildung 4.6-1: Schema - Heizschalenregelung	89
Abbildung 4.6-2: Schema - Förderschneckenregelung.....	89
Abbildung 4.6-3: Verkabelungsplan - Schaltschrank	90
Abbildung 4.6-4: Elektroschrank - Aufbau	91
Abbildung 4.7-1: Messbox mit PC	93
Abbildung 4.7-2: Anschlüsse Messbox.....	93
Abbildung 4.7-3: Benutzeroberfläche "Mobile Measurement"-Software.....	93
Abbildung 4.7-4: Vergleich Regelverhalten PID-Regler [53].....	94
Abbildung 4.7-5: "Self-Tune" Funktion PID-Regler [55].....	94
Abbildung 4.7-6: Kalibrierung - Brennstofffördermenge	97
Abbildung 4.7-7: Kalibrierkurve FU bei 0,5Hz.....	97
Abbildung 4.7-8: Vergleich Holz- und Zwiebelschalenpellets	98
Abbildung 4.7-9: Siebturm.....	99
Abbildung 4.7-10: Quarzsand im Anlieferungszustand [39]	99
Abbildung 4.7-11: Teilchengrößenanalyse - Verteilungsdichte.....	100
Abbildung 4.7-12: Teilchengrößenanalyse - Verteilungssumme	100
Abbildung 4.7-13: Teilchengrößenanalyse - Verteilungsdichte, Anzahlverteilung	100
Abbildung 4.8-1: Druckverlustkurve Lochboden bei unterschiedlichen Temperaturen.....	102
Abbildung 4.8-2: Druckverlustkurven - 350µm, RT	103
Abbildung 4.8-3: Druckverlustverlauf - 350µm, Wirbelschicht bei RT.....	103
Abbildung 4.8-4: Druckverlustkurven - 350µm, 850°C	104
Abbildung 4.8-5: Druckverlustverlauf – 350µm, Wirbelschicht bei 850°C	104
Abbildung 4.8-6: Druckverlust/Volumenstrom-Diagramm, 350µm, 850°C	105
Abbildung 4.8-7: Druckverlustkurven - 450µm, RT	106
Abbildung 4.8-8: Druckverlustverlauf - 450µm, Wirbelschicht bei RT.....	107
Abbildung 4.8-9: Druckverlustkurven - 450µm, 850°C	107
Abbildung 4.8-10: Druckverlustverlauf – 450µm, Wirbelschicht bei 850°C	108
Abbildung 4.8-11: Druckverlust/Volumenstrom-Diagramm, 450µm, 850°C	108

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 4.8-12: Temperaturkurven - Versuch 2.....	111
Abbildung 4.8-13: Lochboden mit Bettmaterial (nach Versuch)	112
Abbildung 4.8-14: Innenablagerung Freeboard (Asche).....	112
Abbildung 4.8-15: Gesamt-Bettmaterial (nach Versuch)	112
Abbildung 4.8-16: Ablagerung Lochboden.....	112
Abbildung 4.8-17: Ascheproben – Vergleich.....	113
Abbildung 4.8-18: Erhitzungsmikroskop	114
Abbildung 4.8-19: Ascheschmelzkurven - ZP-550 und ZP-850	115
Abbildung 4.8-20: Ascheschmelzkurve - Versuche 2 und 3	116
Abbildung 4.8-21: Bild Analyse (EMI II) - Versuch 2	118
Abbildung 4.8-22: Messaufbau - V3.....	119
Abbildung 4.8-23: Aufbau Messsonde - V3.....	119
Abbildung 4.8-24: Abgasmessung - Versuch 3.1	120
Abbildung 4.8-25: Ausschnitt Reh-Diagramm - Versuch 3.2	121
Abbildung 4.8-26: Abgasmessung - Versuch 3.2	121

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1-1: Elemente biogener Festbrennstoffe und deren Auswirkung [10]	15
Tabelle 3.1-2: Energiespezifische Eigenschaften [10].....	16
Tabelle 3.1-3: Physikalisch-mechanische Eigenschaften [10]	17
Tabelle 3.1-4: Brennstoffanalysen in Masse-% Trockenmasse [12]	18
Tabelle 3.1-5: Ascheanalysen in Masse-% Trockenmasse [12]	18
Tabelle 3.3-1: Vergasungsreaktionen [8]	21
Tabelle 3.4-1: Oxidationsreaktionen [8]	25
Tabelle 3.4-2: Entschwefelungsmechanismus mit Kalkstein [11].....	25
Tabelle 3.5-1: Alternative Bettmaterialien [24].....	40
Tabelle 4.2-1: Messstellenliste	58
Tabelle 4.3-1: Werte zu Einzelpartikel und Haufwerk	61
Tabelle 4.3-2: Ergebnisse Ar-Zahl und Lockerungsgeschwindigkeit.....	62
Tabelle 4.3-3: Verwendete Stoffwerte für Luft bei unterschiedlichen Temperaturen.....	63
Tabelle 4.3-4: Ergebnis Partikelaustrag bei Lockerungsgeschwindigkeit	64
Tabelle 4.3-5: Ergebnis dimensionslose Kennzahlen - nach Grace.....	65
Tabelle 4.3-6: Ergebnis Arbeitspunkt - nach Grace.....	67
Tabelle 4.3-7: Ergebnis Volumenstrom - nach Grace.....	67
Tabelle 4.3-8: Ergebnis Strömungsgeschwindigkeit, Austrag am LP - nach Reh.....	69
Tabelle 4.3-9: Ergebnis Volumenstrom - nach Reh.....	69
Tabelle 4.3-10: Vergleich Ergebnisse - Berechnung / Reh	70
Tabelle 4.3-11: Vergleich Ergebnisse - Grace / Reh	70
Tabelle 4.3-12: Annahmen und Werte für Lochboden	71
Tabelle 4.3-13: Ergebnisse Druckverlust	72
Tabelle 4.3-14: Ergebnis Lochgeschwindigkeit	73
Tabelle 4.3-15: Ergebnis Freiflächenverhältnis, Lochanzahl, Teilung	74
Tabelle 4.3-16: Biomasseproben Analyseergebnisse in Masse-% Trockenmasse	75
Tabelle 4.3-17: Erfahrungswerte Luftüberschuss [11].....	78
Tabelle 4.3-18: Werte für Längsausdehnung Rohrkompensator	79
Tabelle 4.3-19: Werte für Schüttkegel Quarzsand.....	80
Tabelle 4.4-1: Auszug Stückliste - Apparatur	87

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 4.5-1: Auszug Stückliste - Equipment.....	88
Tabelle 4.6-1: Auszug Stückliste - Elektrokomponenten.....	92
Tabelle 4.7-1: Einstellwerte PID-Regler	95
Tabelle 4.7-2: Einstellwerte Antriebsmotor	96
Tabelle 4.8-1: Vergleich - Messung zu Berechnung, 350µm, RT.....	104
Tabelle 4.8-2: Vergleich - Messung zu Berechnung, 350µm, 850°C.....	105
Tabelle 4.8-3: Vergleich - Messung zu Berechnung, 450µm, RT.....	107
Tabelle 4.8-4: Einstellwerte Versuch 1 und 2	109
Tabelle 4.8-5: Vergleich Erweichungs-, Fließtemperatur – Proben Muffelofen.....	116
Tabelle 4.8-6: Vergleich Erweichungs-, Fließtemperatur – Proben Wirbelschichtapparatur ...	117

Anhang

A - Nomenklatur

Symbol	Einheit	Beschreibung
A	mm^2	Querschnittsfläche (WS)
$A_{Loch/0}$	mm^2	Querschnittsfläche Lochbohrung
$A_{Reaktor/WS}$	mm^2	Querschnittsfläche Reaktor/Wirbelschicht
Ar	-	Archimedeszahl
C_w	-	Strömungs-Widerstandsbeiwert
$CO_{2,max}$	Vol-%	Maximale Kohlendioxidgehalt
$CO_{2,gem}$	Vol-%	Gemessener Kohlendioxidgehalt
D	mm	Durchmesser (WS)
d_0	μm	Lochdurchmesser
d_p	μm	Partikeldurchmesser
d_{sv}	μm	Sauterdurchmesser
d_i	μm	Innendurchmesser, Siebdurchmesser
d_K	μm	Kugeldurchmesser
d_L	μm	Ausgetragener Partikeldurchmesser
d_p^*	-	Dimensionslose Partikeldurchmesser
F_G	$\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$	Gewichtskraft
F_A	$\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$	Auftriebskraft
F_W	$\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$	Widerstandskraft
F_B	$\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$	Beschleunigungskraft
Fr	-	Froude-Zahl
f	-	Feststoffverteilung
f_0	-	Freiflächenverhältnis
g	m/s^2	Erdbeschleunigung
H_{WS}	mm	Schütthöhe bzw. Betthöhe (=Höhe WS am LP)

ANHANG

H_O	kJ/kg	Brennwert
H_U	kJ/kg	Heizwert
L	Nm ³ /kg(BST)	Verbrennungsluftmenge
L_{min}	Nm ³ /kg(BST)	Mindestluftmenge
l_0	mm	Referenzlänge
\dot{m}_{BST}	kg/h	Brennstoffmenge pro Zeiteinheit (Massenstrom)
$M_{Schüttung}$	kg	Gewicht Schüttung
m_{ZS}	g	Masse Zwiebelschalenpellets
$N_{(Loch)}$	-	Lochanzahl
n	mol	Stoffmenge
$O_{2,min}$	Nm ³ /kg(BST)	Mindestsauerstoffbedarf
$O_{P/K}$	mm ²	Oberfläche Partikel/Kugel
$p_{N/U}$	bar	Druck Norm-/Umgebungszustand
$\Delta P_{D/B/WS}$	bar	Druckverlust Distributor/Bed/Wirbelschicht
\dot{Q}	m ³ /s	Gasvolumenstrom
Q3	-	Verteilungssumme
q3	m ⁻¹	Verteilungsdichte
R	kg·m ² /s ² ·mol·K	Gaskonstante
Re	-	Reynoldszahl
r_K	mm	Radius Kegelgrundfläche
r	MJ/kg	Verdampfungsenthalpie des Wassers
s	mm	Dicke
$T_{N/U/B}$	K/°C	Temperatur Norm-/Umgeb./Betriebszustand
t	mm	Teilung bzw. Lochabstand
$t_{Dreieck}$	mm	Teilungsabstand
t_{v2}	h	Versuchsdauer Versuch 2
U	m/s	Leerrohrgeschwindigkeit
U_0	m/s	Geschwindigkeit Lochbohrung
U_L, U_{mf}	m/s	Lockerungsgeschwindigkeit
U_S, U_t	m/s	Schwebegeschwindigkeit

ANHANG

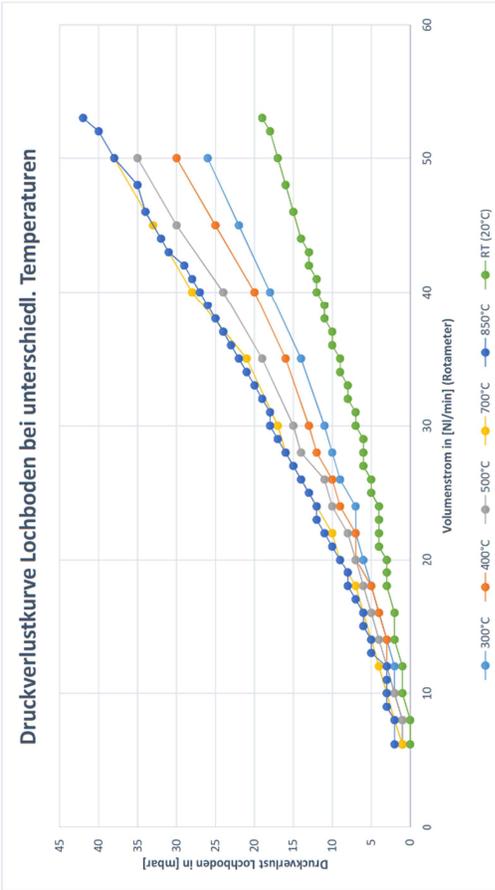
U_c	m/s	Grenze zwischen blasenbildender und turbulenter WS
U_{se}	m/s	Grenze zwischen turbulenter und schneller WS
$U_{Windbox}$	m/s	Strömungsgeschwindigkeit in Windbox (=U)
$U_{AP/LP}$	m/s	Rohrgeschwindigkeit Arbeits-/Lockerungspunkt
$U_{\#\#}$	m/s	Rohrgeschwindigkeit bei $\#\#^\circ\text{C}$
U^*	-	Dimensionslose Leerrohrgeschwindigkeit
\dot{V}	l/min	Volumenstrom
\dot{V}_{BST}	l/min	Brennstoffvolumen pro Zeiteinheit (Volumenstrom)
\dot{V}_{LP}	l/min	Volumenstrom am Lockerungspunkt
$V_{Schüttung}$	m^3	Volumen Schüttung
$V_{min,tr}$	$\text{Nm}^3/\text{kg}_{(BST)}$	Trockene Abgasmenge
$V_{N/U}$	m^3	Volumen Norm-/Umgebungszustand
$V_{P/K}$	mm^3	Volumen Partikel/Kugel
V_b	mm^3	Gesamt-Bettvolumen (Schüttung)
V_{PS}	mm^3	Gesamt-Partikelvolumen (Schüttung)
α	K^{-1}	Ausdehnungskoeffizient
$\alpha_{Schüttkegel}$	$^\circ$	Schüttwinkel
ε	-	Porosität
$\varepsilon_{FB/L}$	-	Porosität Festbett/Lockerungspunkt
ρ_P	kg/m^3	Partikeldichte
ρ_b	kg/m^3	Schüttdichte
ρ_g	kg/m^3	Gasdichte
μ_g	kg/ms	Dynamische Viskosität Gas
ν	m^2/s	Kinematische Viskosität Gas
ξ_0	-	Widerstandsbeiwert
λ	-	Luftverhältniszahl
Φ	-	Formfaktor
Ω	-	Liatschenko/Beranek-Zahl (Kennzahl im Zustandsdiagr.)
φ	-	Verhältnis Strömungsgeschwindigkeiten (Loch zu WS)
c/h/s/o/n/a/w	kg/kg	Gehalt an Element x

Abkürzung	Beschreibung
AP	Arbeitspunkt
BM	Biomasse
BS, BST	Brennstoff
DT	Erweichungstemperatur
FT	Fließtemperatur
HP	Holzpellets
HT	Halbkugeltemperatur
LP	Lockerungspunkt
MFC	Mass flow controller
RT	Raumtemperatur
SP	Schwebepunkt
ST	Sintertemperatur
TDH	Transport disengaging height
VM	Vergasungsmittel
WS	Wirbelschicht
ZP	Zwiebelschalenpellets

D – Druckverlustmessungen

Messung Druckverlust: LB
Temperatur: 20°C - 850°C
Bettmaterial: -
WS...Wirbelschicht
LB...Lochboden
LP...Lockerungspunkt

LB - RT		LB - 300°C		LB - 400°C		LB - 500°C		LB - 700°C		LB - 850°C	
Volumenstrom	Druckverlust										
V [Nl/min]	dP [mbar]										
6,2	0	6,2	1	6,2	1	6,2	1	6,2	1	6,2	2
8	0	8	1	8	1	8	1	8	2	8	2
10	1	10	2	10	2	10	2	10	3	10	3
12	1	12	2	12	3	12	3	12	4	12	3
14	2	14	3	14	4	14	4	14	5	14	3
16	2	16	4	16	5	16	5	16	6	16	3
18	3	18	5	18	5	18	6	18	7	18	5
20	3	20	6	20	7	20	7	20	9	20	5
22	3	22	7	22	7	22	8	22	10	22	6
24	4	24	7	24	9	24	10	24	12	24	6
26	4	26	9	26	10	26	11	26	14	26	7
28	4	28	10	28	12	28	14	28	16	28	8
30	4	30	11	30	13	30	15	30	17	30	8
32	5	32	14	32	16	32	19	32	21	32	9
34	5	34	18	34	20	34	24	34	28	34	10
36	6	36	22	36	25	36	30	36	33	36	11
38	6	38	26	38	30	38	35	38	38	38	12
40	6	40	26	40	30	40	35	40	38	40	12
42	7	42	26	42	30	42	35	42	38	42	12
44	7	44	26	44	30	44	35	44	38	44	12
46	7	46	26	46	30	46	35	46	38	46	12
48	7	48	26	48	30	48	35	48	38	48	12
50	7	50	26	50	30	50	35	50	38	50	12
52	7	52	26	52	30	52	35	52	38	52	12
53	7	53	26	53	30	53	35	53	38	53	12



LB - RT		LB - 300°C		LB - 400°C		LB - 500°C		LB - 700°C		LB - 850°C	
Volumenstrom	Druckverlust										
V [Nl/min]	dP [mbar]										
6,2	0	6,2	1	6,2	1	6,2	1	6,2	1	6,2	2
8	0	8	1	8	1	8	1	8	2	8	2
10	1	10	2	10	2	10	2	10	3	10	3
12	1	12	2	12	3	12	3	12	4	12	3
14	2	14	3	14	4	14	4	14	5	14	3
16	2	16	4	16	5	16	5	16	6	16	3
18	3	18	5	18	5	18	6	18	7	18	5
20	3	20	6	20	7	20	7	20	9	20	5
22	3	22	7	22	7	22	8	22	10	22	6
24	4	24	7	24	9	24	10	24	12	24	6
26	4	26	9	26	10	26	11	26	14	26	7
28	4	28	10	28	12	28	14	28	16	28	8
30	4	30	11	30	13	30	15	30	17	30	8
32	5	32	14	32	16	32	19	32	21	32	9
34	5	34	18	34	20	34	24	34	28	34	10
36	6	36	22	36	25	36	30	36	33	36	11
38	6	38	26	38	30	38	35	38	38	38	12
40	6	40	26	40	30	40	35	40	38	40	12
42	7	42	26	42	30	42	35	42	38	42	12
44	7	44	26	44	30	44	35	44	38	44	12
46	7	46	26	46	30	46	35	46	38	46	12
48	7	48	26	48	30	48	35	48	38	48	12
50	7	50	26	50	30	50	35	50	38	50	12
52	7	52	26	52	30	52	35	52	38	52	12
53	7	53	26	53	30	53	35	53	38	53	12

Messung Druckverlust: WS u. LB
Temperatur: Raumtemperatur
Bettmaterial: 350µm Quarzsand
WS...Wirbelschicht
LB...Lochboden
LP...Lockerungspunkt
SP...Schwebepunkt

LP_{Grate}=10,4 Nl/min
 LP_{Messung}=12 Nl/min
 LP_{Reh}=14,8 Nl/min

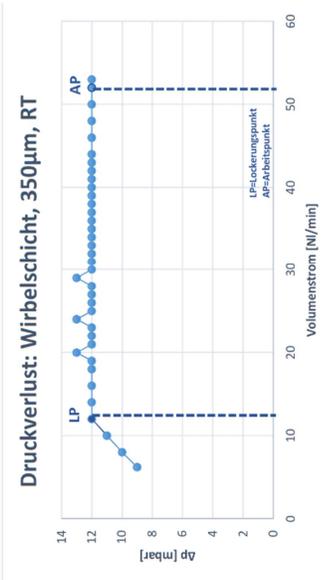
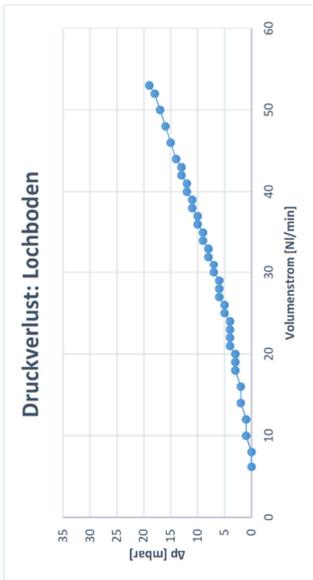
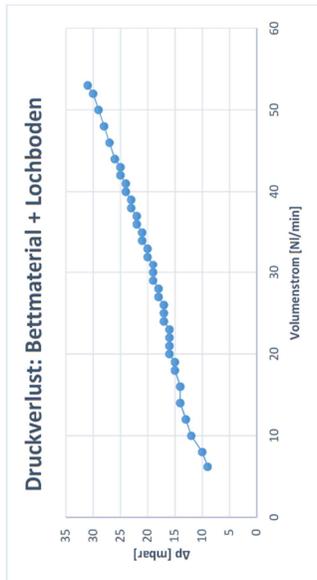
WS + LB		Differenz	
Volumenstrom V [Nl/min]	Druckverlust dP [mbar]	Volumenstrom V [Nl/min]	Druckverlust dP [mbar]
6,2	9	6,2	9
8	10	8	10
10	12	10	11
12	13	12	12
14	14	14	12
16	14	16	12
18	15	18	12
19	15	19	12
20	16	20	13
21	16	21	12
22	16	22	12
23	16	23	12
24	17	24	13
25	17	25	12
26	17	26	12
27	18	27	12
28	18	28	12
29	19	29	13
30	19	30	12
31	19	31	12
32	20	32	12
33	20	33	12
34	21	34	12
35	21	35	12
36	22	36	12
37	22	37	12
38	23	38	12
39	23	39	12
40	24	40	12
41	24	41	12
42	25	42	12
43	25	43	12
44	26	44	12
46	27	46	12
48	28	48	12
50	29	50	12
52	30	52	12
53	31	53	12
59	n.a.	59	n.a.

LB		Differenz	
Volumenstrom V [Nl/min]	Druckverlust dP [mbar]	Volumenstrom V [Nl/min]	Druckverlust dP [mbar]
6,2	0	6,2	9
8	0	8	10
10	1	10	11
12	1	12	12
14	2	14	12
16	2	16	12
18	3	18	12
19	3	19	12
20	3	20	13
21	4	21	12
22	4	22	12
23	4	23	12
24	4	24	13
25	5	25	12
26	5	26	12
27	6	27	12
28	6	28	12
29	6	29	13
30	7	30	12
31	7	31	12
32	8	32	12
33	8	33	12
34	9	34	12
35	9	35	12
36	10	36	12
37	10	37	12
38	11	38	12
39	11	39	12
40	12	40	12
41	12	41	12
42	13	42	12
43	13	43	12
44	14	44	12
46	15	46	12
48	16	48	12
50	17	50	12
52	18	52	12
53	19	53	12
59	n.a.	59	n.a.

WS + LB		Differenz	
Volumenstrom V [Nl/min]	Druckverlust dP [mbar]	Volumenstrom V [Nl/min]	Druckverlust dP [mbar]
6,2	9	6,2	9
8	10	8	10
10	12	10	11
12	13	12	12
14	14	14	12
16	14	16	12
18	15	18	12
19	15	19	12
20	16	20	13
21	16	21	12
22	16	22	12
23	16	23	12
24	17	24	13
25	17	25	12
26	17	26	12
27	18	27	12
28	18	28	12
29	19	29	13
30	19	30	12
31	19	31	12
32	20	32	12
33	20	33	12
34	21	34	12
35	21	35	12
36	22	36	12
37	22	37	12
38	23	38	12
39	23	39	12
40	24	40	12
41	24	41	12
42	25	42	12
43	25	43	12
44	26	44	12
46	27	46	12
48	28	48	12
50	29	50	12
52	30	52	12
53	31	53	12
59	n.a.	59	n.a.

AP_{Grate}=52,0 Nl/min

AP_{Reh}=59,3 Nl/min

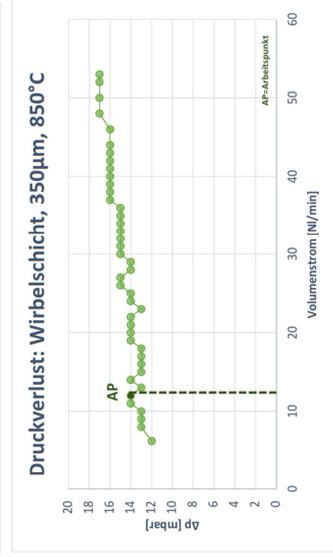
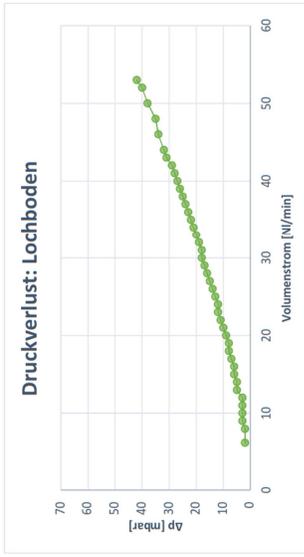
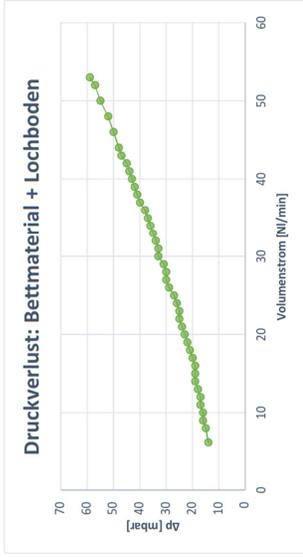


Messung Druckverlust: WS u. LB
Temperatur: 850°C
Bettmaterial: 350µm Quarzsand
WS... Wirbelschicht
LB... Lochboden
LP... Lockerungspunkt
SP... Schwebepunkt

LP_{ReH}=1,6 Nl/min
LP_{GrRe}=1,8 Nl/min

AP_{GrRe}=10,8 Nl/min
AP_{ReH}=12,4 Nl/min

WS + LB		LB		Differenz	
Volumenstrom V [Nl/min]	Druckverlust dP [mbar]	Volumenstrom V [Nl/min]	Druckverlust dP [mbar]	Volumenstrom V [Nl/min]	Druckverlust dP [mbar]
1,6	n.a.	1,6	n.a.	1,6	n.a.
1,8	n.a.	1,8	n.a.	1,8	n.a.
6,2	14	6,2	2	6,2	12
8	15	8	2	8	13
9	16	9	3	9	13
10	16	10	3	10	13
11	17	11	3	11	14
12	17	12	3	12	14
13	18	13	5	13	13
14	19	14	5	14	14
15	19	15	6	15	13
16	19	16	6	16	13
17	20	17	7	17	13
18	21	18	8	18	13
19	22	19	8	19	14
20	23	20	9	20	14
21	24	21	10	21	14
22	25	22	11	22	14
23	25	23	12	23	13
24	26	24	12	24	14
25	27	25	13	25	14
26	29	26	14	26	15
27	30	27	15	27	15
28	30	28	16	28	14
29	31	29	17	29	14
30	33	30	18	30	15
31	33	31	18	31	15
32	34	32	19	32	15
33	35	33	20	33	15
34	36	34	21	34	15
35	37	35	22	35	15
36	38	36	23	36	15
37	40	37	24	37	16
38	41	38	25	38	16
39	42	39	26	39	16
40	43	40	27	40	16
41	44	41	28	41	16
42	45	42	29	42	16
43	47	43	31	43	16
44	48	44	32	44	16
46	50	46	34	46	16
48	52	48	35	48	17
50	55	50	38	50	17
52	57	52	40	52	17
53	59	53	42	53	17
72	n.a.	72	n.a.	72	n.a.
93	n.a.	93	n.a.	93	n.a.



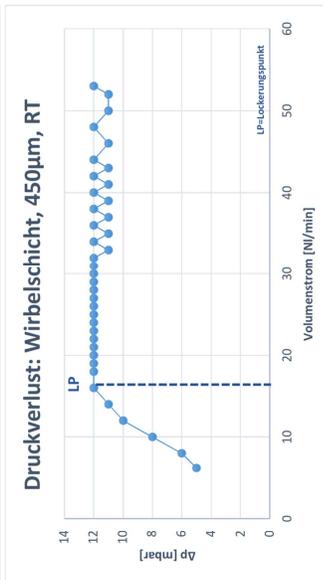
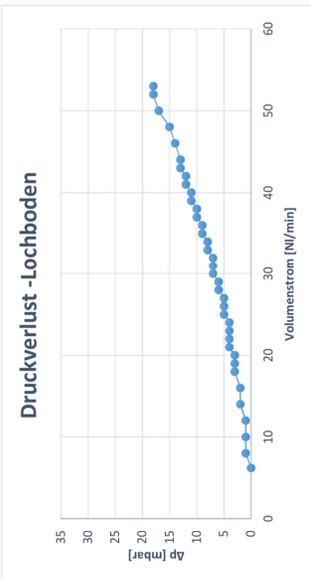
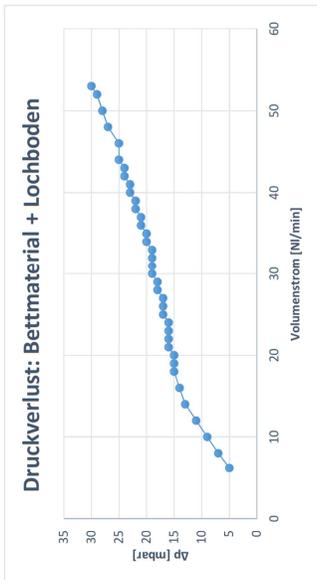
SP_{GrRe}=72 Nl/min
SP_{ReH}=93 Nl/min

Messung Druckverlust: WS u. LB
Temperatur: Raumtemperatur
Bettmaterial: 450µm Quarzsand
WS...Wirbelschicht
LB...Lochboden
LP...Lockerungspunkt
SP...Schwebepunkt

WS + LB		Differenz	
Volumenstrom	Druckverlust	Volumenstrom	Druckverlust
V [Nl/min]	dP [mbar]	V [Nl/min]	dP [mbar]
6,2	5	6,2	5
8	7	8	6
10	9	10	8
12	11	12	10
14	13	14	11
16	14	16	12
18	15	18	12
19	15	19	12
20	15	20	12
21	16	21	12
22	16	22	12
23	16	23	12
24	16	24	12
25	17	25	12
26	17	26	12
27	17	27	12
28	18	28	12
29	18	29	12
30	19	30	12
31	19	31	12
32	19	32	12
33	19	33	11
34	20	34	12
35	20	35	11
36	21	36	12
37	21	37	11
38	22	38	12
39	22	39	11
40	23	40	12
41	23	41	11
42	24	42	12
43	24	43	11
44	25	44	12
46	25	46	11
48	27	48	12
50	28	50	11
52	29	52	11
53	30	53	12

LB		Differenz	
Volumenstrom	Druckverlust	Volumenstrom	Druckverlust
V [Nl/min]	dP [mbar]	V [Nl/min]	dP [mbar]
6,2	0	6,2	5
8	1	8	6
10	1	10	8
12	1	12	10
14	2	14	11
16	2	16	12
18	3	18	12
19	3	19	12
20	3	20	12
21	4	21	12
22	4	22	12
23	4	23	12
24	4	24	12
25	5	25	12
26	5	26	12
27	5	27	12
28	6	28	12
29	6	29	12
30	7	30	12
31	7	31	12
32	7	32	12
33	8	33	11
34	8	34	12
35	9	35	11
36	9	36	12
37	10	37	11
38	10	38	12
39	11	39	11
40	11	40	12
41	12	41	11
42	12	42	12
43	13	43	11
44	13	44	12
46	14	46	11
48	15	48	12
50	17	50	11
52	18	52	11
53	18	53	12

WS + LB		Differenz	
Volumenstrom	Druckverlust	Volumenstrom	Druckverlust
V [Nl/min]	dP [mbar]	V [Nl/min]	dP [mbar]
6,2	5	6,2	5
8	7	8	6
10	9	10	8
12	11	12	10
14	13	14	11
16	14	16	12
18	15	18	12
19	15	19	12
20	15	20	12
21	16	21	12
22	16	22	12
23	16	23	12
24	16	24	12
25	17	25	12
26	17	26	12
27	17	27	12
28	18	28	12
29	18	29	12
30	19	30	12
31	19	31	12
32	19	32	12
33	19	33	11
34	20	34	12
35	20	35	11
36	21	36	12
37	21	37	11
38	22	38	12
39	22	39	11
40	23	40	12
41	23	41	11
42	24	42	12
43	24	43	11
44	25	44	12
46	25	46	11
48	27	48	12
50	28	50	11
52	29	52	11
53	30	53	12



LP_{Messung}=16 Nl/min
 LP_{Gate}=17 Nl/min

LP_{Reh}=23 Nl/min

67	n.a.
69	n.a.

67	n.a.
69	n.a.

67	n.a.
69	n.a.

AP_{Gate}=67 Nl/min
 AP_{Reh}=69,2 Nl/min

Messung Druckverlust: WS u. LB
Temperatur: 850°C
Bettmaterial: 450µm Quarzsand
WS...Wirbelschicht
LB...Lochboden
LP...Lockerungspunkt
SP...Schwebepunkt

LP_{grace}=1,8 NI/min
LP_{ret}=2,4 NI/min

AP_{grace}=21,3 NI/min
AP_{ret}=21,7 NI/min

SP_{grace}=101 NI/min
SP_{ret}=96 NI/min

WS + LB		Druckverlust	
Volumenstrom	V [NI/min]	dP [mbar]	n.a.
1,8	n.a.		
2,4	n.a.		
6,2	14	2	
8	15	2	
9	16	3	
10	16	3	
11	17	3	
12	17	3	
13	18	5	
14	18	5	
15	19	6	
16	19	6	
17	20	7	
18	21	8	
19	22	8	
20	23	9	
21	24	10	
22	25	11	
23	25	12	
24	26	12	
25	27	13	
26	27	14	
27	28	15	
28	29	16	
29	30	17	
30	31	18	
31	32	18	
32	33	19	
33	35	20	
34	35	21	
35	36	22	
36	37	23	
37	38	24	
38	40	25	
39	40	26	
40	41	27	
41	42	28	
42	44	29	
43	45	31	
44	46	32	
46	48	34	
48	53	35	
50	53	38	
52	56	40	
53	59	42	

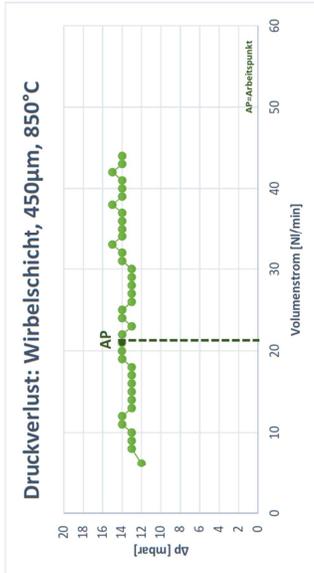
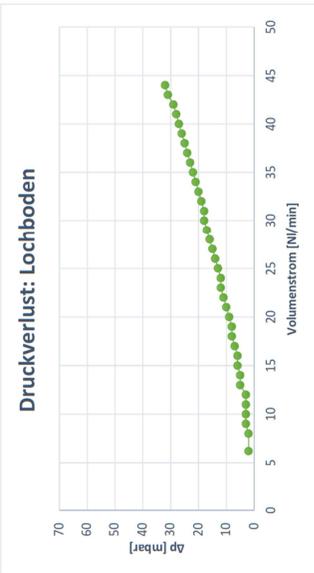
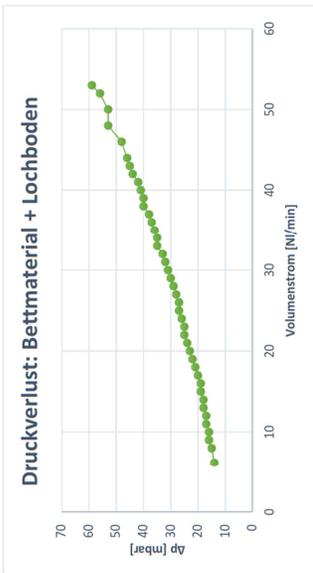
101	n.a.
96	n.a.

LB		Druckverlust	
Volumenstrom	V [NI/min]	dP [mbar]	n.a.
1,8	n.a.		
2,4	n.a.		
6,2	2	2	
8	2	3	
9	3	3	
10	3	3	
11	3	3	
12	3	3	
13	5	5	
14	5	6	
15	6	6	
16	6	7	
17	7	8	
18	8	8	
19	8	9	
20	9	10	
21	10	11	
22	11	12	
23	12	13	
24	12	14	
25	13	14	
26	14	15	
27	15	16	
28	16	17	
29	17	18	
30	18	18	
31	18	19	
32	19	20	
33	20	21	
34	21	22	
35	22	23	
36	23	24	
37	24	25	
38	25	26	
39	26	27	
40	27	28	
41	28	29	
42	29	31	
43	31	32	
44	32	34	
46	34	35	
48	35	38	
50	38	40	
52	40	42	
53	42		

101	n.a.
96	n.a.

Differenz		Druckverlust	
Volumenstrom	V [NI/min]	dP [mbar]	n.a.
1,8	n.a.		
2,4	n.a.		
6,2	12	13	
8	13	13	
9	13	13	
10	13	14	
11	14	14	
12	14	14	
13	13	13	
14	13	13	
15	13	13	
16	13	13	
17	13	13	
18	13	13	
19	14	14	
20	14	14	
21	14	14	
22	14	13	
23	13	13	
24	14	14	
25	14	13	
26	13	13	
27	13	13	
28	13	13	
29	13	13	
30	13	13	
31	14	14	
32	14	14	
33	15	15	
34	14	14	
35	14	14	
36	14	14	
37	14	14	
38	15	15	
39	14	14	
40	14	14	
41	14	14	
42	15	15	
43	14	14	
44	14	14	
46	14	14	
48	15	15	
50	18	18	
52	16	16	
53	17	17	

101	n.a.
96	n.a.

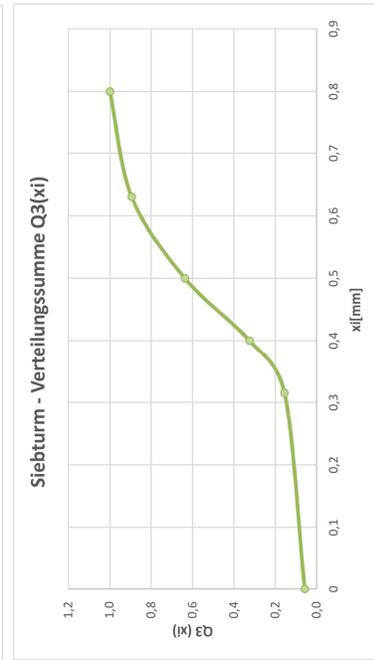
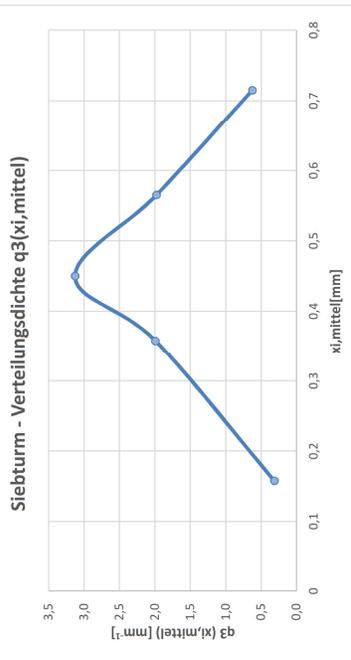


E – Siebturmanalyse

Siebturmanalyse

Maschenweite x_i [mm]	Masse Sieb leer [g]	Masse Sieb und Siebgut [g]	Masse Sieb gut G_i [g]
0,8	474,6	522,2	47,6
0,63	256,2	371,8	115,3
0,5	246,4	387	140,6
0,4	237,2	313,3	76,1
0,315	226,6	270,8	44,2
0	192,7	218,3	25,6
Gesamtmasse G_0 [g]			449,7
Aufgabe [g]			450
Siebverlust [g]			0,3

Maschenweite x_i [mm]	$x_{i,mittel}$ [mm]	Δx_i [mm]	G_i [g]	$q_3(x_{i,mittel})$ [mm ⁻³]	$Q_3(x_i)$ [mm ⁻³]	$x_{i,mittel}^{-3} \cdot q_3 \cdot \Delta x_i$
0		25,6				
0,315	0,158	0,315	44,2	0,312025	2,348473	25,15693383
0,4	0,358	0,085	76,1	1,990870	0,324	3,703681488
0,5	0,45	0,1	140,6	3,126529	0,637	3,431032973
0,63	0,565	0,13	115,6	1,977387	0,894	1,425245253
0,8	0,715	0,17	47,6	0,622637	1,000	0,28957825
Gesamtmasse G_0 [g]			449,7			
Aufgabe [g]			450			
Siebverlust [g]			0,3			
				$M_{-3,3} =$		34,00647179



$$q_3(x_{i,mittel}) = \frac{G_i}{G_0 \cdot \Delta x_i}$$

$$x_{i,mittel} = \frac{x_i + x_{i+1}}{2}$$

$$\Delta x_i = x_{i+1} - x_i$$

$$Q_3(x_i) = \sum_{j=1}^i \frac{G_j}{G_0}$$

$$q_0(x_{i,mittel}) = \frac{x_{i,mittel}^{-3} \cdot q_3(x_{i,mittel})}{M_{-3,3}}$$

$$M_{-3,3} = \sum x_{i,mittel}^{-3} \cdot q_3(x_{i,mittel}) \cdot \Delta x_i$$

